

Série A
N° d'Ordre
47

THÈSES

PRÉSENTÉES

à la Faculté des Sciences de l'Université de Nancy

POUR OBTENIR

le grade de Docteur ès Sciences Physiques

PAR

Marcel PATRY

1^{re} THÈSE - Recherches expérimentales sur la combustion et la
détonation des substances explosives.

2^e THÈSE - Propositions données par la Faculté.

Soutenues le 22 Mars 1933 devant la Commission d'examen

Président M. TRAVERS.

Examineurs. { MM. CHEVALLIER.
LAFFITTE.

NANCY

SOCIÉTÉ D'IMPRESSIONS TYPOGRAPHIQUES

1933



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Série A
N° d'Ordre
47

THÈSES

PRÉSENTÉES

à la Faculté des Sciences de l'Université de Nancy

POUR OBTENIR

le grade de Docteur ès Sciences Physiques

PAR

Marcel PATRY

**1^{re} THÈSE - Recherches expérimentales sur la combustion et la
détonation des substances explosives.**

2^e THÈSE - Propositions données par la Faculté.

Soutenues le Mars 1933 devant la Commission d'examen

Président. M. TRAVERS.
Examineurs. { MM. CHEVALLIER.
 LAFFITTE.

NANCY
SOCIÉTÉ D'IMPRESSIONS TYPOGRAPHIQUES
1933

Université de Nancy - Faculté des Sciences

Doyen: M. LEAU

Assesseur: M. GAIN

Doyen honoraire : M. PETIT

Professeurs honoraires: MM. CARTAN, BLAISE, THOULET, MULLER, GUYOT, GUNTZ, GRIGNARD, DARMOIS E., GUTTON.

Maîtres de conférences honoraires: MM. FÉRÉ
DELATOUR

Chargé de cours honoraire : M. MILLOT

Professeurs:

MM. CUÉNOT.....	Zoologie.
MAUDUIT	Electrotechnique.
GAIN	Botanique.
HUSSON.....	Mécanique rationnelle.
TRAVERS.....	Chimie industrielle.
VAVON.....	Chimie organique.
BOURION.....	Chimie physique et Electrochimie.
LEAU.....	Calcul différentiel et intégral.
DARMOIS.....	Analyse supérieure.
FALLOT.....	Géologie.
CORNUBERT.....	Chimie.
LONGCHAMBON...	Minéralogie.
COURTOT.....	Chimie appliquée à la teinture.
CROZE.....	Physique.
MENTRÉ.....	Mécanique appliquée.
BOIN.....	Zoologie appliquée.
DE MALLEMANN.	Physique.
JOLY.....	Géologie de Lorraine.
CHEVALLIER.....	Physique.

Maîtres de Conférences:

MM. RAYBAUD	Botanique.
DELSARTE.....	Mathématiques appliquées.
POIROT.....	Physique.

Chargé de cours:

M. LAFFITTE..... Chimie générale.

Maître de conférences adjoint:

M. FRIEDEL..... Botanique.

Secrétaire: M. BERTRAND



A MES PARENTS

Témoignage d'affection et de
reconnaissance

A Monsieur G. URBAIN,
Membre de l'Institut,
Professeur à la Sorbonne,
Président du Comité Scientifique des Poudres et Explosifs.

Hommage respectueux

A Monsieur P. LAFFITTE,
Chargé de cours à la Faculté des Sciences
de Nancy.

Hommage de profonde
gratitude.

INTRODUCTION^(*)

A. — Définitions et historique

On désigne sous l'appellation générale *d'explosifs solides*, des mélanges ou des combinaisons solides, susceptibles de donner lieu à une réaction très rapide, exothermique, accompagnée d'un important dégagement gazeux.

Suivant la vitesse de propagation du phénomène dans l'explosif on distinguera les *combustions* (ou *déflagrations*) des *détonations*.

Combustions. — Le mécanisme de la combustion est très simple. On la produit généralement par inflammation, c'est-à-dire par élévation locale de la température de l'explosif au-dessus de sa température d'inflammation. La partie de l'explosif en combustion transmet, en brûlant, de la chaleur aux parties voisines, élevant ainsi leur température; lorsque cette dernière atteint la température d'inflammation, elles brûlent à leur tour, et ainsi de suite. La combustion se propage donc par simple *conductibilité thermique*. La vitesse de propagation des combustions est en général de l'ordre du centimètre ou du mètre par seconde. Dépendant des conditions extérieures, elle n'est pas caractéristique de l'explosif.

Détonations. — Le régime de la détonation est caractérisé par l'*onde explosive*, découverte par BERTHELOT et VIEILLE dans le cas des mélanges gazeux explosifs en 1881 (1). Voici le mécanisme de ce phénomène :

Une tranche du mélange gazeux étant amenée à une pression élevée, sa température croît, puis la combustion a lieu. Cette tranche comprime à son tour la tranche suivante, qui brûle également, et ainsi de suite.

C'est le même mécanisme qui préside à la détonation, dans le cas des explosifs liquides et solides.

Dans l'onde explosive, il y a donc coexistence d'un phénomène mécanique et d'un phénomène chimique, d'où le nom d'onde de choc et de combustion qu'on lui donne parfois. Sa vitesse est toujours très grande, et notamment bien supérieure à la vitesse de l'onde sonore.

(*) Les nombres entre parenthèses renvoient à l'index bibliographique, placé à la fin du mémoire.

La propriété essentielle de l'onde explosive, reconnue d'ailleurs aussitôt par BERTHELOT et VIEILLE, est sa vitesse constante qui (à température et pression constante), ne dépend que de la nature de l'explosif, dans le cas des gaz, pour des tubes de diamètre supérieur à quelques millimètres.

Théorie de l'onde explosive. — BERTHELOT et VIEILLE (2) rapprochèrent la vitesse de l'onde explosive « de la vitesse moyenne de translation par seconde, des molécules gazeuses constitutives des produits de la combustion, vitesse calculée pour la température absolue théorique T de la réaction d'après la formule de CLAUSIUS :

$$U = 29,354 \sqrt{\frac{T}{d}} \text{ m/sec.}$$

d étant la densité du gaz par rapport à l'air ». Les vitesses obtenues expérimentalement diffèrent souvent, d'une façon sensible, de celles calculées à l'aide de cette formule.

Plus tard, DIXON (3) rapprocha la vitesse de l'onde explosive de la vitesse du son dans ces mêmes gaz, à la température de combustion. D'une manière générale, l'accord n'est pas très bon entre les deux séries de valeurs obtenues, l'une expérimentalement, l'autre en appliquant la formule donnée par DIXON.

La véritable théorie de l'onde explosive a pour point de départ les travaux de RIEMANN et d'HUGONOT (4) sur la propagation des ondes de choc dans les fluides inertes. D'après la théorie d'HUGONOT, si une discontinuité se produit dans un gaz parfait (c'est le cas pour une onde de choc se propageant dans un gaz inerte et où une tranche passe très brusquement de la pression atmosphérique à une pression très élevée), chacune des tranches qui en subit l'effet éprouve une variation brusque de pression et par suite de densité. Si la discontinuité se produit de façon à comprimer le gaz, la vitesse de propagation est supérieure à la vitesse normale du son, et n'a d'ailleurs pas de limite.

Le premier, SCHUSTER (5) a ébauché la théorie. Malheureusement, ignorant les travaux d'HUGONOT, il ne put pousser son étude bien loin.

C'est CHAPMANN (6) qui a, le premier, donné la théorie complète de l'onde explosive, allant jusqu'aux calculs théoriques. JOUGUET (7), indépendamment de CHAPMANN, et presque simultanément, arriva à des résultats analogues. Ces deux auteurs ont étendu les recherches d'HUGONOT au cas où la transmission de la pression entraîne un changement dans la

constitution chimique du milieu, comme c'est le cas pour l'onde explosive. JOUGUET a dû faire les hypothèses suivantes :

1° Le changement de constitution se fait sur le front de l'onde, et immédiatement derrière l'onde l'état du mélange est un état d'équilibre ;

2° Les gaz obéissent aux lois des gaz parfaits, mais la chaleur spécifique est fonction de la température ;

En outre, pour lever une indétermination, il a tenu compte des deux propriétés expérimentales suivantes :

1° La propagation de l'onde est indifférente aux conditions aux limites en arrière. On observe en effet la même célérité que l'inflammation soit produite à l'extrémité ouverte ou à l'extrémité fermée d'un tube, et quel que soit le mode d'inflammation.

2° La célérité est uniforme. Cela résulte des expériences de BERTHELOT et VIEILLE, de MALLARD et LE CHATELIER et de DIXON.

Les valeurs de la vitesse de détonation, calculées à partir des théories de CHAPMANN et de JOUGUET, sont en général en bon accord avec les valeurs calculées expérimentalement.

Signalons que la théorie de JOUGUET permet de différencier théoriquement les déflagrations des détonations. D'après cet auteur, le meilleur critérium que l'on puisse donner pour caractériser les déflagrations est le fait que la pression varie peu au passage de la flamme*, tous les cas entre une variation de pression faible, déflagration franche et une variation de pression forte, détonation, étant d'ailleurs possibles.

Explosions. — Les termes combustion — ou déflagration — et détonation, correspondent à deux modes de décomposition bien différents, et en général bien définis, de la substance explosive. Le terme explosion a un sens beaucoup moins précis ; nous l'emploierons, conformément à l'usage, pour désigner l'ensemble de la combustion et de la détonation, ou bien encore dans les cas douteux où on ne peut savoir s'il y a ou non une véritable détonation.

Explosifs proprement dits. — Si on excepte la poudre noire dans laquelle seule la combustion est possible et certains explosifs comme l'azoture de plomb (N^6Pb) où seule la détonation semble possible, les explosifs solides peuvent, suivant les conditions, brûler ou détoner. Avant même la découverte de l'onde explosive, ROUX et SARRAU (9) avaient distingué

(*) CRUSSARD (8) envisage le problème d'une manière plus absolue en exigeant, pour les déflagrations, une variation de pression nulle.

dans la dynamite deux modes différents d'explosion : l'un qu'ils appelaient *explosion du premier ordre ou détonation*, l'autre *explosion du second ordre* (qui correspond à la déflagration) analogue à la combustion de la poudre noire. L'explosion du premier ordre était provoquée par une percussion suffisante (ou par amorçage à l'aide du fulminate de mercure); l'explosion du second ordre se produisait par inflammation de la dynamite.

Souvent, une combustion peut donner naissance à une détonation. La réciproque est plus rare, cependant, dans le cas des mélanges gazeux explosifs, CAMPBELL (10) et LAFFITTE (11) ont montré, en créant une discontinuité sur le chemin de l'onde explosive, que la détonation peut se transformer en combustion.

Entre la déflagration et la détonation, régimes extrêmes, on a signalé souvent, dans les mélanges gazeux explosifs, des régimes intermédiaires, par exemple pendant la formation de l'onde explosive.

Nous appellerons explosif solide proprement dit, ou plus simplement *explosif solide*, tout mélange ou combinaison solide susceptible de prendre le régime de la détonation, réservant le nom de poudre à ceux qui, comme la poudre noire, ne peuvent donner lieu qu' à une combustion.

Notons d'ailleurs que, suivant leur état physique, certains produits peuvent être considérés comme poudre ou comme explosif; par exemple le coton poudre à l'état de gelée colloïdale est une poudre, à l'état pulvéru-lent un explosif.

Nos recherches ont porté uniquement sur les explosifs solides.

Explosifs d'amorçage; explosifs secondaires. — Suivant la difficulté que l'on éprouve à provoquer leur détonation, les explosifs solides tels qu'ils viennent d'être définis, se divisent en deux catégories :

1° Les *explosifs d'amorçage*;

2° Les *explosifs secondaires*.

Les premiers sont susceptibles de prendre rapidement, par simple inflammation, le régime de la détonation. On peut citer, parmi les plus employés dans la pratique : le fulminate de mercure et l'azoture de plomb.

Les autres (explosifs secondaires), par exemple l'acide picrique cristallisé ou fondu, le tétryl, le trotyl, ne peuvent pas être amenés à détoner directement sous l'action d'une flamme. Pour déclancher leur détonation, il faut faire appel à un artifice d'amorçage. On utilise généralement dans ce but les explosifs d'amorçage, mis sous forme de détonateur, c'est-à-dire contenus dans un petit cylindre métallique où ils sont plus ou moins comprimés.

BREF HISTORIQUE DES RECHERCHES SUR LES EXPLOSIFS SOLIDES

Les premières recherches sur les phénomènes explosifs ayant un caractère purement scientifique, ne remontent pas au delà de 1870. L'étude des mélanges gazeux explosifs précéda d'ailleurs, dans un grand nombre de cas, celle des explosifs solides. Les plus importantes recherches sur les explosifs solides furent, à cette époque, entreprises par la Commission des Substances Explosives, présidée par BERTHELOT qui publia en 1883, un ouvrage fondamental « Sur la force des matières explosives d'après la thermochimie ». « Tout en proposant de définir la force des substances explosives par la seule connaissance des réactions chimiques » il aborda dans cet ouvrage, un grand nombre de problèmes intéressant la déflagration et la détonation. Dans le cours de ce mémoire, nous aurons fréquemment l'occasion de nous reporter à cet ouvrage.

En 1885, BERTHELOT (12) publia les résultats des premières mesures des vitesses de détonation des explosifs solides. La méthode utilisée pour ces déterminations était la suivante : L'explosif était introduit dans des tubes en plomb de 100 à 200 m. de longueur et de 1 à 2 mm. de diamètre. A l'intérieur du tube se trouvaient, à une distance déterminée, deux feuilles minces d'étain, parcourues par un courant électrique qui était interrompu au moment du passage du phénomène explosif. Le passage de l'onde explosive était enregistré à l'aide d'un chronographe qui permettait d'apprécier l'intervalle de temps compris entre les deux interruptions du courant, et par conséquent de connaître la vitesse de détonation entre les deux points où le circuit était interrompu par l'explosion.

Depuis cette époque, on a proposé un assez grand nombre de méthodes pour la mesure des vitesses de détonation. Les auteurs en sont : METTEGANG (13), KAST (14), DAUTRICHE (15), WAGSTAFF (16), RADAKOVIC (17).

La plus importante de ces méthodes est celle de DAUTRICHE. Elle est trop connue pour qu'il soit nécessaire de la décrire ici en détails. Rappelons seulement qu'elle est basée sur l'emploi de cordons détonants ayant une vitesse de détonation constante et mesurée avec précision par une méthode chrono-électrique.

En 1924, LAFFITTE (18) appliqua pour la première fois, à l'étude de la détonation des explosifs solides, la méthode d'enregistrement photographique de MALLARD et LE CHATELIER (19), imaginée pour les recherches sur les mélanges gazeux. Le principe en est le suivant : Un appareil photographique est placé en face d'un tube de verre horizontal, contenant le mélange combustible. La plaque est fixée à un cadre vertical à coulisses, le long

duquel elle tombe en chute libre. Elle déclanche l'allumage électrique des gaz au moment de son passage devant l'objectif. La vitesse est donnée par la hauteur de chute de la plaque. L'inclinaison de la tangente en chaque point de l'image permet de calculer la vitesse de propagation du phénomène en chaque point.

Cette méthode, qui a le grand avantage de donner un enregistrement continu des phénomènes, a permis à MALLARD et LE CHATELIER d'étudier en détail la déflagration, la formation de l'onde explosive et la détonation des mélanges gazeux.

DIXON (20) perfectionna ce dispositif en remplaçant la plaque photographique par un film sensible enroulé sur un cylindre tournant à grande vitesse. Il utilisa ce dispositif pour l'étude d'un grand nombre de problèmes ayant trait à la combustion ou à la détonation des mélanges gazeux.

LAFFITTE, utilisant un dispositif analogue à celui de DIXON, a pu non seulement mesurer des vitesses de détonation d'explosifs solides contenus dans des tubes de verre, mais encore étudier un certain nombre de phénomènes lumineux produits par la détonation.

Après LAFFITTE, divers expérimentateurs ont étudié la détonation des explosifs solides par la méthode d'enregistrement photographique. Citons parmi les principaux travaux exécutés par cette méthode, ceux de PERROTT et GAWTHROP (21), JONES (22), TADENSZ URBANSKI (23), PAYMANN *et ses Collaborateurs* (24).

En dehors de la mesure des vitesses de détonation, un très grand nombre de travaux théoriques et expérimentaux ont été exécutés, au cours de ces 40 dernières années, sur les explosifs solides. Dus, pour la plupart, à des techniciens, ils visent souvent l'application pratique des explosifs. L'analyse scientifique des phénomènes est encore peu avancée, beaucoup moins par exemple que pour les mélanges gazeux.

Nous ne reproduirons pas la bibliographie complète de la question. Dans le cours de ce mémoire, nous indiquerons seulement, au fur et à mesure, les travaux les plus importants se rapportant au sujet même de nos recherches.

On trouvera une bibliographie complète de la question des explosifs solides dans les ouvrages suivants :

BRUNSWIG : *Explosivstoffe*, Leipzig, 1923.

KAST : *Spreng und Zündstoffe*, Braunschweig, 1921.

En ce qui concerne les explosifs d'amorçage seulement dans :

R. ESCALES et A. STETTBACHER : *Initialexplosivstoffe*, Leipzig, 1917.

Pour l'étude théorique, dans :

JOUGUET : *Mécanique des explosifs*, Paris, 1917.

B. — Plan du mémoire

Nos recherches ayant porté sur un certain nombre de questions relatives à la combustion et à la détonation des explosifs solides, nous en avons exposé les principaux résultats dans l'ordre suivant :

Dans le premier chapitre, nous décrivons les explosifs que nous avons employés. Pour ceux que nous avons préparés au laboratoire, nous avons indiqué le mode de préparation choisi. En ce qui concerne le fulminate de mercure que nous avons utilisé pour l'étude d'un grand nombre de phénomènes explosifs, nous avons aussi étudié quelques-unes de ses propriétés physiques et chimiques.

Dans le chapitre suivant sont rapportés les résultats des recherches que nous avons entreprises au sujet de l'action de la chaleur sur les explosifs et en particulier sur les explosifs d'amorçage. Nous avons mis au point une méthode d'étude de la décomposition et de l'inflammation des explosifs à température constante. Le cas du fulminate de mercure a été traité en détail. L'influence de la pression dans la chambre d'explosion et de divers autres facteurs a été élucidée.

Le chapitre III est consacré à l'étude, par la méthode d'enregistrement chrono-photographique de MALLARD et LE CHATELIER, de la formation de l'onde explosive dans les explosifs d'amorçage. Dans la première partie du chapitre, on trouvera la description de la méthode et de l'appareillage utilisés.

Le chapitre IV traite du problème de l'amorçage et de la formation de l'onde explosive dans les explosifs secondaires.

Le chapitre V est consacré à l'étude, par la méthode photographique, de la détonation et des phénomènes lumineux qu'elle provoque.

Dans le chapitre VI, nous avons décrit une nouvelle méthode optique permettant l'enregistrement photographique de phénomènes non lumineux (ondes de choc, éclats solides) provoqués par les détonations.

Dans le chapitre VII, nous avons rapporté les recherches entreprises avec le dispositif précédent, sur les ondes de choc produites dans les milieux transparents par la détonation. En particulier, le cas important de l'onde aérienne a fait l'objet d'une étude détaillée. Sa position par rapport aux phénomènes lumineux a été déterminée à différentes distances de l'explosif.

Le dernier chapitre est consacré à l'application des résultats et des méthodes précédemment décrits au problème de la transmission de la détonation à distance à travers l'air. D'autres milieux, comme le bois, ont fait l'objet de quelques expériences. Après avoir précisé le mécanisme de la

transmission, nous avons étudié la formation de l'onde explosive dans l'explosif excité, en particulier lorsque la distance de ce dernier à l'explosif excitateur tend vers la limite pour laquelle la transmission cesse d'être possible.

Enfin, nous avons résumé, dans une conclusion, les principaux résultats auxquels nous sommes parvenus au cours de nos recherches.

Nos recherches ont été entreprises et exécutées sous les auspices du Comité Scientifique des Poudres et Explosifs. Nous sommes heureux d'exprimer au Président de cet organisme, M. le Professeur G. URBAIN, Membre de l'Institut, nos sentiments de respectueuse reconnaissance pour l'intérêt qu'il n'a cessé de nous témoigner et nos plus vifs remerciements pour l'aide qui nous a été fournie.

M. LE CHATELIER, Membre de l'Institut, a bien voulu s'intéresser à ce travail et en présenter diverses conclusions à l'Académie des Sciences. Nous tenons à lui exprimer notre respectueuse gratitude.

Ce travail a été fait au laboratoire de Chimie Minérale de la Faculté des Sciences de Nancy, sous la direction de M. P. LAFFITTE, auquel nous adressons l'hommage de notre profonde gratitude pour l'aide bienveillante qu'il nous a apportée et tous les conseils qu'il n'a cessé de nous donner.

Nous nous faisons un devoir de remercier M. le Professeur A. TRAVERS, Directeur de l'Institut Chimique de Nancy, pour la bienveillance avec laquelle il a favorisé le développement de notre travail.

Enfin nous remercions cordialement nos camarades, MM. LOCUTY et ELCHARDUS, pour les multiples services qu'ils nous ont rendus au laboratoire.



CHAPITRE PREMIER

EXPLOSIFS UTILISÉS PRÉPARATION - PROPRIÉTÉS

Comme on peut facilement se procurer les *explosifs secondaires* usuels, nous n'avons pas eu à les préparer. Ceux que nous avons utilisés sont les suivants :

Acide picrique cristallisé (Merck);

Dynamite-guhr à 65 % de nitroglycérine;

Dynamite-guhr à 75 % de nitroglycérine;

Dynamite-gomme à 93 % de nitroglycérine.

Ces dynamites provenaient de l'usine de Cugny.

Trinitrophénylméthylnitramine ou *tétryl*, $C^6H^2(NO^2)^3 N < \begin{smallmatrix} CH^3 \\ NO^2 \end{smallmatrix}$
(provenance: Poudrerie de Sorgues).

Scheddites et *cotons-poudre* divers (Laboratoire central des Poudres ou Poudrerie de Sevran-Livry).

Il est très difficile de se procurer, autrement que sous forme de détonateurs, des *explosifs d'amorçage*. Nous avons utilisé des détonateurs de provenances diverses. Tous contenaient 1 gr. 5 d'explosif, qui était soit le fulminate de mercure pur ou mélangé avec des picrates ou du tétryl (fabrication française), soit l'azoture de plomb (N^6Pb) (fabrication allemande).

En plus des détonateurs, nous avons utilisé un grand nombre d'explosifs d'amorçage que nous avons préparés au laboratoire (azotures, fulminates, peroxydes).

AZOTURES

La découverte de l'acide azothydrique (N^3H) et de ses sels, les azotures, est due à CURTIUS (1890). A partir de l'azoture de potassium, nous avons préparé les azotures de plomb, d'argent et de cuivre.

Azoture de Plomb (N^6Pb). — La préparation fut faite, d'après les indications de MATTER (1), de la façon suivante :

On dissout 15 gr. d'acétate de plomb $(CH^3COO)^2 Pb$, 3 H^2O dans 300 cm^3 d'eau. On ajoute 0 cm^3 5 d'acide acétique concentré, puis, goutte à goutte, 250 cm^3 d'une solution à 2 % de N^3K . On agite longtemps, puis on laisse déposer.

Les cristaux très fins et très blancs d'azoture de plomb furent soigneusement lavés par décantation, puis séchés dans le vide de la pompe à huile : 1° sur de la potasse en morceaux ; 2° sur de l'anhydride phosphorique.

Etant donné le danger que présentent les gros cristaux quand ils sont secs, nous nous sommes abstenus de purifier, par recristallisation, le produit obtenu.

L'azoture de plomb est très sensible à l'action de la lumière ; ainsi, au soleil, il se recouvre rapidement d'une pellicule brune. Il est probable que ce fait est dû à une décomposition de l'azoture en plomb et en azote (2).

Récemment, GARNER et GOMM (3) ont indiqué que l'azoture de plomb prenait une coloration noire et devenait plus sensible à l'action de la chaleur quand on le soumettait à la lumière ultra-violette d'une lampe à vapeur de mercure.

Il est insoluble dans l'eau froide, soluble dans l'acide acétique, dans l'acide nitrique dilué, dans l'acide sulfurique.

La meilleure méthode pour analyser l'azoture de plomb consiste à doser l'acide azothydrique (SOMMER et PINCAS) (4), par détermination volumétrique de l'azote.

Plus simplement, on peut se limiter au dosage du plomb ; malheureusement, les impuretés étant constituées en partie par des sels de plomb, les résultats sont, dans ce cas, moins précis que ceux obtenus par la méthode de SOMMER et PINCAS.

Les recherches que nous avons exécutées sur l'azoture de plomb ne nécessitaient pas un produit absolument pur. Aussi nous sommes-nous contentés de vérifier approximativement la pureté du composé préparé en dosant le plomb.

Nos résultats furent bien concordants, et attribuèrent en moyenne au produit une teneur de 70 % en plomb, c'est-à-dire une teneur de 98,3 % en azoture de plomb pur.

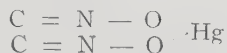
Azoture d'Argent (N^3Ag). — L'azoture d'argent s'obtient d'une façon analogue à l'azoture de plomb, par double décomposition entre l'azoture de potassium en solution à 2 % et l'azotate d'argent en solution à 5 %.

Azoture de Cuivre (N^6Cu). — Il s'obtient encore par double décomposi-

tion entre l'azoture de potassium en solution à 2 % et l'acétate de cuivre en solution à 5 %.

FULMİNATE DE MERCURE

Découvert par HOWARD en 1799, la structure carbylamine, et par suite la formule :



lui furent attribuées, à la suite des travaux de NEF, en 1894.

Ce corps ayant fait l'objet d'une étude particulière et ayant été utilisé dans la plus grande partie de nos recherches, nous allons décrire en détail sa préparation et ses propriétés.

MATIÈRES PREMIÈRES.

Acide nitrique. — Nous avons utilisé l'acide pur à 40° B du commerce. Nous avons vérifié qu'il ne contenait ni acide chlorhydrique, ni acide sulfurique.

Alcool. — L'alcool à 95 % du commerce ne contenant aucune impureté gênante, convient parfaitement pour cette préparation.

Mercure. — Nous avons utilisé du mercure rigoureusement exempt de métaux étrangers, car la présence de fulminates autres que celui de mercure peut être dangereuse, même à l'état de traces. Pour purifier le mercure, on opérait de la façon suivante : 500 grammes de mercure lavé à l'acide nitrique dilué, sont dissous dans l'acide nitrique concentré et transformés en nitrate mercurique. La solution est ensuite neutralisée par une lessive de potasse. L'oxyde mercurique est séché, puis chauffé avec précautions dans une cornue en terre. Le mercure distille lentement et est recueilli dans un sac de toile plongeant dans l'eau froide.

Catalyseur au cuivre. — On dissout 10 grammes de cuivre pur dans 40 cm³ d'acide nitrique à 40° B. Après dissolution totale, on ajoute 15 cm³ d'acide chlorhydrique à 20° B.

PRÉPARATION DU FULMİNATE DE MERCURE.

Fulminate gris. — Nous avons utilisé le procédé classique de préparation. [Voir HOWARD (5), CHANDELON (6), LIEBIG (7), BECKMANN (8), LOBRY DE BRUYN (9)].

On dissout 50 grammes de mercure dans 500 grammes d'acide nitrique

à 40° B. On chauffe pour accélérer la dissolution. Dans un b cher de 4 litres, en verre Pyrex, on met 500 cm³ d'alcool éthylique à 95 %. On verse la solution mercurielle encore chaude (50 à 60 degrés) dans l'alcool. Aussitôt la température du liquide croît, et au bout d'un temps assez long (5 à 10 minutes environ) la réaction s'amorce lentement, puis devient extrêmement violente. Un torrent de vapeurs blanches très denses s'échappent du b cher. Au bout d'une heure, la réaction est terminée ; on lave alors par décantation le fulminate déposé, jusqu'à réaction neutre à l'hélianthine des eaux de lavage. On conserve l'explosif sous l'eau. Cette préparation donne environ 65 grammes de fulminate gris.

Souvent, et en particulier si l'acide n'a pas la concentration voulue, la réaction ne s'amorce pas d'elle-même. Il faut alors chauffer le mélange au bain-marie. Le liquide se trouble et une poudre blanche précipite. En continuant à chauffer, la réaction décrite précédemment se produit à son tour.

Fulminate blanc. — On sait depuis longtemps que si on introduit dans la préparation du fulminate des quantités même faibles de composés chlorés on obtient, au lieu d'un produit gris, un produit à peu près blanc. Cette action des dérivés chlorés a été étudiée expérimentalement par SOLONINA (10) et WÖHLER et TH ODOROWITSCH (11).

Nous avons donc utilisé pour la préparation du fulminate blanc, le catalyseur au cuivre décrit précédemment, en employant les produits dans les proportions suivantes :

Mercure.	70 gr.
NO ³ H � 40° B.	625 gr.
Alcool � 95 %	700 cm ³ + Alcool de correction (voir ci-dessous)
Catalyseur au cuivre.	2 cm ³ 5

Le catalyseur étant mélangé dans le b cher à l'alcool, la préparation se fait comme pour le fulminate gris. Au cours de la réaction, et pour modérer celle-ci, on ajoute environ 100 à 150 cm³ d'alcool dit de correction, en particulier lorsque la mousse tend à déborder du b cher, ou quand les vapeurs deviennent rutilantes. On lave comme pour le fulminate gris. Dans ces conditions, on obtient environ 85 grammes de fulminate blanc.

Le fulminate est conservé sous l'eau. A mesure des besoins, on le sèche (par quantités dépassant rarement 100 grammes) dans le vide de la pompe

à huile : 1° sur de la potasse en morceaux ; 2° sur de l'anhydride phosphorique.

Au cours de nos recherches nous avons préparé au laboratoire, sans aucun incident, une quantité totale de fulminate de mercure de l'ordre de 5 à 6 kilogrammes.

PROPRIÉTÉS DU FULMINATE DE MERCURE.

Couleur. — On indique généralement dans la littérature que le fulminate de mercure se présente sous deux aspects différents, blanc ou gris, suivant que l'on utilise ou non, dans sa préparation, des dérivés chlorés comme catalyseurs. Il est bien plus exact de dire que le fulminate se présente suivant les conditions, sous un aspect variant du gris très foncé au blanc pur. Nous avons en effet obtenu, sans catalyseur, mais en faisant varier les concentrations de l'acide nitrique et de l'alcool, ainsi que la température de la solution mercurielle, des produits allant du gris foncé au blanc crème, avec des teintes intermédiaires nombreuses et variées. La grosseur des cristaux était d'ailleurs aussi très variable. Malheureusement, il ne nous a pas été possible de préciser la cause ni la marche de ces variations, et il est même arrivé plusieurs fois que des préparations qui nous semblaient identiques, donnèrent naissance à des produits d'aspect différent.

La cause de la différence de coloration entre le fulminate gris et le fulminate blanc a d'ailleurs fait l'objet d'un assez grand nombre de recherches et de discussions. Beaucoup d'hypothèses ont été émises ; aucune ne semble reposer sur des bases bien solides. Cette question a été en particulier discutée par LANGHANS (12). Les principales explications proposées sont les suivantes :

1° La couleur grise est due à des impuretés, et en particulier au mercure métallique (BERTHELOT, VIEILLE, TSCHELOW). Cette hypothèse ne semble pas devoir être retenue, car si le mercure métallique est bien une impureté du fulminate gris, le fulminate blanc en contient également quand il n'a pas été recristallisé.

2° La couleur grise proviendrait de la présence de matières colloïdales, et l'on aurait affaire à des corps voisins de l'acide azulmique et de ses combinaisons brunes (PHILIP).

3° La couleur grise est due à une pigmentation (KAST).

Forme cristalline — D'après KAST (13), la variété grise est formée de cristaux monocliniques de forme normale et la variété blanche d'enchevêtrements de cristaux en forme de lancettes. En vérité, nous n'avons observé

aucune différence sensible entre les produits bruts obtenus directement par les méthodes précédemment décrites. Leur aspect se rapproche toujours de celui indiqué par KAST, comme caractérisant la variété grise. On trouve bien des cristaux enchevêtrés, mais aussi bien dans le cas de la substance grise que dans celui de la substance blanche. Au contraire, le fulminate blanc obtenu en purifiant l'un ou l'autre de ces produits par dissolution dans l'ammoniaque et précipitation par l'acide acétique, présente au microscope un aspect bien différent et conforme à la description de KAST pour le fulminate blanc.

Solvants. — Le fulminate de mercure est très peu soluble dans l'eau froide. L'eau chaude le dissout mieux, et par refroidissement, il cristallise avec une demi-molécule d'eau ; il a alors une coloration jaune.

Les solutions de cyanure de potassium le dissolvent bien. STEINER (14) a utilisé cette propriété pour le purifier par recristallisation.

A 30-35°, l'ammoniaque en solution concentrée en dissout quatre fois son poids. On peut le précipiter très pur de cette solution, comme l'ont montré STEINER (15) et PHILIP (16). A 60°, il est par contre décomposé assez rapidement.

La pyridine à chaud, d'après SOLONINA (17) en dissout 14,5 fois son poids. Cette dissolution le décompose légèrement. On l'emploie néanmoins comme méthode de purification.

Il est soluble, mais avec réaction immédiate (procédé de dosage), dans l'hyposulfite de soude.

Si le contact se prolonge suffisamment longtemps, notons que le fulminate n'est stable dans aucun solvant.

Analyse. — Diverses méthodes, exposées en détail dans l'ouvrage de R. ESCALES et A. STETTACHER (*loc. cit.*, p. 143), ont été proposées pour l'analyse du fulminate de mercure. Elles sont basées sur les principes suivant :

1° Dosage du mercure :

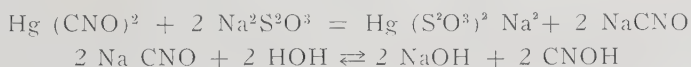
- a) à l'état de chlorure mercurieux HgCl (ROSE) (18) ;
- b) à l'état de sulfure de mercure HgS (SOLONINA) (19) ;
- b) par voie électrolytique (SOLONINA) (19).

2° Par titrimétrie :

- a) méthode de BROWNSDON (20), étudiée et perfectionnée par PHILIP (21) ;
- b) méthode iodométrique de PHILIP (22).

Au cours de nos recherches, nous avons toujours utilisé de la manière suivante la méthode de BROWNSDON :

Le fulminate de mercure est dissout dans une solution d'hyposulfite de sodium. Il y a formation d'alcali libre, probablement par suite de dédoublement hydrolytique du fulminate de sodium suivant les réactions :



On titre cet alcali par de l'acide sulfurique n/10. On emploie l'hélianthine comme indicateur *pour l'observation de conditions déterminées*. Il est donc nécessaire de faire un titrage comparatif avec du fulminate pur, et d'opérer toujours dans les mêmes conditions de quantité et de temps. Nous avons considéré comme pur le fulminate obtenu à la suite de deux cristallisations de fulminate gris ordinaire dans l'ammoniaque, ce qui est, d'après MILES (23), exact à 1/1000 près.

NICOLARDOT et BOUDET (24) ont montré que les diverses impuretés (nitrate mercurique, nitrate mercureux, oxalate mercurique, oxalate mercureux, mercure métallique) que peut contenir le fulminate de mercure sont insolubles dans les solutions d'hyposulfites alcalins. La méthode de BROWNSDON est donc très recommandable.

Voici (tableau I), les résultats des analyses effectuées par cette méthode sur nos préparations.

TABLEAU I

PRODUITS	TENEUR EN FULMINATE %
Fulminate recristallisé deux fois (dissolution dans l'ammoniaque et précipitation immédiate par l'acide acétique dilué, en refroidissant vigoureusement pour empêcher l'élévation de température).	100 par hypothèse (voir ci-dessus)
Fulminate recristallisé une fois par le même procédé.....	99,7
Fulminate gris non recristallisé.....	99
Fulminate blanc non recristallisé (obtenu en utilisant 2 cm ³ de catalyseur par 50 gr. de mercure)	98
Fulminate blanc non recristallisé (obtenu en utilisant 5 cm ³ de catalyseur par 50 gr. de mercure)	97

Densité du fulminate de mercure. — On trouve, dans la littérature, trois valeurs, d'ailleurs discordantes, pour la densité du fulminate de mercure.

BERTHELOT (25) indique 4,42, SOLONINA (26) donne 4,39 pour un produit blanc purifié par dissolution et recristallisation dans une solution de cyanure de potassium. Enfin MILES (23) a trouvé 4,307 pour un produit blanc titrant 99,9 % en fulminate (d'après la méthode de BROWNSDON).

Pour expliquer ces discordances, nous avons cherché une relation entre la densité, la couleur, la pureté de différentes préparations. Les mesures de densité furent exécutées par la méthode du flacon, à 0°, en employant comme liquide un mélange de xylènes. Le tableau II reproduit les résultats obtenus.

TABLEAU II

COULEUR	TENEUR	DENSITÉ
	EN FULMINATE %	
Blanc	99,7	4,32
Gris	99	4,36
Blanc	98	4,38
Blanc	97	4,40

La couleur a donc une influence inappréciable, mais la densité est d'autant plus élevée que le fulminate est moins pur. Le mercure métallique semble être la cause des grandes différences observées. En effet, la présence de mercure métallique libre, signalée déjà par plusieurs auteurs, a pu être vérifiée directement dans le dépôt résiduel, lors de la dissolution de fulminate impur dans l'ammoniaque.

Action des radiations ultra-violettes. — Ayant remarqué que le fulminate de mercure blanc laissé longtemps au soleil prenait une teinte légèrement jaunâtre, nous avons étudié l'action des rayons ultra-violet sur ce composé.

Soumis aux radiations d'une lampe à vapeur de mercure, la surface du fulminate change rapidement de couleur, et devient brun-noirâtre au bout de quelques heures. Cette transformation se produit aussi bien avec le fulminate blanc qu'avec le fulminate gris. Comme elle intéresse seulement la surface, il est impossible d'obtenir un produit entièrement transformé. En homogénéisant la masse tous les jours, on obtient, au bout d'un mois, une substance à peu près noire, que nous avons étudiée.

L'analyse de ce produit a montré que sa teneur en mercure (mesuré à l'état de HgS) est, aux erreurs d'expériences près, égale à celle du fulminate non transformé (Tableau III).

TABLEAU III

PRODUITS ANALYSÉS	TENEUR EN MERCURE
Fulminate blanc titrant 99,7 % à la réaction de Brownsdon.....	70,8
Même produit après 6 jours d'exposition.....	71,2
Même produit après 1 mois d'exposition.....	71,3

Il est donc vraisemblable que nous nous trouvons devant un cas d'isomérisation ou de polymérisation. Comme il n'existe pas de solvant convenable, nous n'avons pu songer à faire une étude cryoscopique.

Ce produit de transformation est soluble dans les solutions d'hyposulfite de soude et de cyanure de potassium, mais en laissant cependant un léger dépôt noir. En raison de sa faible importance, nous n'avons pu caractériser d'une façon certaine la nature de ce dépôt. Une décomposition lente des explosifs, aux températures inférieures à la température d'inflammation, étant chose fréquente, nous croyons avoir affaire à du mercure partiellement ou totalement oxydé produit par la réaction :



se produisant lentement, sans explosion, sous l'influence des rayons ultraviolets. A l'appui de cette hypothèse, citons le fait que, pendant la transformation, nous avons observé une perte légère mais continue de poids. La surface du fulminate étant environ 40 cm², et la quantité mise en jeu 5 gr., cette perte est d'environ 6 mgr. par jour.

Sa dissolution dans les solutions d'hyposulfite de soude se fait avec réaction alcaline, mais la soude se forme en quantité moins importante que si on opère avec du fulminate non transformé (au bout de 10 jours d'exposition 9/10 environ).

Contrairement au fulminate, il ne se dissout pas entièrement dans l'ammoniaque et dans la pyridine. Il y a formation d'un louche noirâtre.

Sa cristallisation est absolument identique à celle du fulminate sur lequel a été opéré la transformation. Nous étudierons ses propriétés explosives à la suite de celles du fulminate, dans le prochain chapitre.

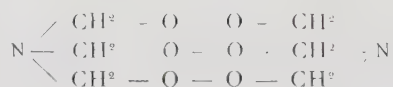
FULMINATE D'ARGENT (AgCNO)

La préparation du fulminate d'argent est à peu près identique à celle du fulminate de mercure. Nous avons opéré d'après la méthode indiquée par GAY-LUSSAC et LIEBIG (27).

10 gr. d'argent sont dissous dans 200 gr. d'acide nitrique, de densité 1,36 à 1,38. Cette solution est versée dans 270 gr. d'alcool à 85-90 %. On chauffe le mélange au bain-marie jusqu'à produire une légère ébullition, puis on laisse refroidir. Il se dégage un mélange très complexe de vapeurs inflammables et il se dépose des aiguilles blanches, très fines, de fulminate d'argent. La réaction est moins violente que pour le sel de mercure.

On recueille le fulminate d'argent sur un filtre et on lave jusqu'à réaction neutre à l'héliantine des eaux de lavage. Cette préparation est très délicate et très dangereuse, le fulminate d'argent étant, même humide, extrêmement sensible au frottement. Il nous est arrivé, lors du prélèvement d'un peu de substance avec une spatule en verre, que la préparation entière détone dans son bain de formation.

HEXAMETHYLENETRIPEROXYDEDIAMINE



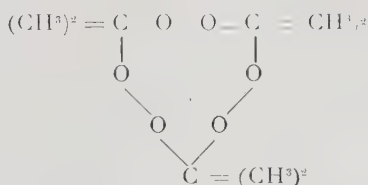
La méthode de préparation utilisée est due à GIRSEWALD (28). TAYLOR et RINKENBACH (29) en ont donné une description détaillée.

On dissout 14 gr. d'hexaméthylènetétramine dans 45 gr. d'eau oxygénée à 30 %, refroidie par de l'eau glacée. On ajoute ensuite 21 gr. d'acide citrique solide, puis on agite en continuant à refroidir jusqu'à dissolution complète. On laisse la solution reposer pendant 3 à 4 heures, en agitant souvent et en refroidissant de façon à ce que la température arrive très lentement, au bout de 2 heures environ, à celle de la salle. Les cristaux précipités sont filtrés à la trompe, lavés à l'eau, puis rincés à l'alcool. On sèche comme pour le fulminate.

On obtient environ 13 gr. d'un produit blanc très fin. D'après KOESTER (30), cette préparation donne un produit dont la pureté est irréprochable. Il est d'ailleurs impossible de purifier l'hexaméthylènetriperoxydediamine par recristallisation, car on ne connaît pas de solvants convenant à la dissolution de quantités notables de ce composé (29).

PEROXYDE DE TRICYCLOACETONE

Découvert par WOLFFENSTEIN (31), ce composé a pour formule brute $(C^3O^2H^6)^3$ (32), et pour formule développée (33) :



La préparation se fait d'après BAEYER et VILLIGER (32), de la façon suivante :

On mélange 8 gr. d'acétone à 16 gr. d'eau oxygénée à 30 %, en refroidissant par de l'eau glacée. On ajoute lentement 19 gr. d'HCl concentré, en refroidissant et en remuant bien. Le produit obtenu est séparé par filtration et lavé à l'eau.

Ce peroxyde se présente sous la forme de petits cristaux blancs, très volatils, d'une odeur forte rappelant celle de l'acétone. Leur point de fusion est 90-94° d'après BAEYER et VILLIGER (32) et 97°, d'après WOLFFENSTEIN (31).

Nous avons essayé de purifier le produit obtenu par recristallisation dans l'alcool; nous avons obtenu, après séchage dans le vide, de trop gros cristaux inutilisables.



CHAPITRE II

ACTION DE LA CHALEUR SUR LE FULMINATE DE MERCURE

Tous les explosifs sont sensibles à l'action de la chaleur. Suivant la température à laquelle ils se trouvent portés, leur décomposition peut avoir des caractères très différents. Dans tous les cas cependant, portés à une température suffisamment élevée dans un temps assez court ils explosent*. La température minima nécessaire pour produire cette décomposition s'appelle la température d'explosion. C'est une caractéristique importante de l'explosif. Elle est souvent difficile à définir avec précision. En effet, dans le cas par exemple des mélanges de méthane et d'oxygène, MALLARD et LE CHATELIER (1) ont montré que, pour certaines températures, ce mélange explose avec un retard. C'est le phénomène du retard à l'inflammation. Dans le cas des mélanges de méthane et d'oxygène étudiés par ces auteurs, à 650° le mélange explose au bout de 10 secondes, et il faut atteindre 1000° pour que l'explosion soit instantanée. La théorie de ce phénomène a été exposée par JOUGUET (2). Aux températures immédiatement inférieures à la température d'explosion sans retard, la combinaison du méthane et de l'oxygène a lieu avec une vitesse fort appréciable (pré-flamme d'après DIXON). Le mélange en brûlant tend à s'échauffer. Si les parois du vase ne le refroidissent pas trop, sa combustion s'accélère, et l'inflammation a lieu, dès que la température du mélange devient égale à la température d'inflammation sans retard, correspondant à sa composition à cet instant. Voir à ce sujet PRETTRE (Thèses, Paris 1931).

Avec les explosifs solides, des retards d'explosion ont été depuis longtemps déjà signalés par WÖHLER et METTER (3), et WÖHLER (4) dans le cas des azotures et par TAFFANEL, DAUTRICHE, DURR et PERRIN (5) dans le cas du fulminate de mercure.

(*) Nous employons ici le terme *explosion* à dessein, sans spécifier s'il s'agit d'une détonation ou d'une combustion. Nous examinerons plus loin, pour certains cas particuliers importants, la nature de cette décomposition.

MURAOUR (6) a donné des retards d'explosion une explication théorique qui présente une certaine analogie avec celle exposée par JOUGUET dans le cas des mélanges gazeux. Quand un explosif est chauffé lentement, la température d'explosion mesurée est inférieure à sa température d'explosion réelle. Cela tient au fait que la température de l'enceinte, qui est la seule considérée, est inférieure à la température de l'explosif, par suite d'une décomposition partielle de celui-ci. « Cet apport interne d'énergie calorifique est d'autant plus grand que le chauffage est effectué plus lentement, il entraîne cette conséquence que la température de l'enceinte nécessaire pour amener l'explosion est d'autant plus basse que le chauffage est effectué plus lentement. Le décalage entre la température de l'enceinte et la température de l'explosif a été particulièrement bien mis en évidence dans un travail exécuté sur la nitroglycérine, en 1912, sous la direction de C.-E. MUNROÉ, par W.-O. SNELLING et G. STORM » (7).

Cette différence de température a été mesurée récemment, d'une façon directe, par GARNER et GOMM (8), dans le cas de l'azoture de plomb. D'après ces auteurs, sa valeur est faible, deux ou trois degrés seulement.

D'après ce qui précède, la détermination précise de la température d'explosion devrait comprendre la détermination de deux températures : l'une correspondant à l'explosion avec retard, l'autre à l'explosion sans retard. Dans le cas des mélanges gazeux, un assez grand nombre de mesures ont été faites dans ce sens (DIXON). Pour les explosifs solides, au contraire, il n'en est pas ainsi. Deux méthodes ont été utilisées pour la détermination de leurs températures d'explosion.

La première consiste à chauffer l'explosif à température régulièrement croissante, et à noter la température au moment de l'explosion. La température d'explosion ainsi mesurée dépend, comme il résulte des considérations précédentes, de la vitesse de chauffe (4) (9). Elle est d'autant plus élevée que cette vitesse est plus grande. Elle a bien une valeur pratique, puisqu'elle permet, en opérant toujours de la même façon, de comparer les différents explosifs, mais au point de vue théorique, elle n'est pas suffisamment précise. Malgré cette objection, cette méthode a été généralement utilisée pour la détermination des températures d'explosion. Les auteurs utilisant des vitesses d'échauffement variables, les chiffres publiés sont presque toujours très discordants.

La seconde méthode consiste à chauffer l'explosif à température constante. Elle permet de mesurer les températures d'explosion avec retard et sans retard. Elle ne fut, malgré cet avantage, utilisée que tout à fait ex-

ceptionnellement, et dans aucun cas, la détermination des deux températures d'explosion n'a été effectuée.

Même en opérant avec cette dernière méthode, les températures mesurées ne sont pas encore des constantes caractéristiques de l'explosif seulement. Elles dépendent toujours de la quantité d'explosif utilisé (4) (9); elles peuvent en outre dépendre du dispositif expérimental et de la densité de chargement. Enfin l'influence de la pression et de la nature du milieu gazeux en contact avec l'explosif n'a jamais été étudiée.

L'explosion n'est pas le seul phénomène qui se produise par chauffage des explosifs. Avec les corps volatils, il y a vaporisation ou décomposition avec dégagement de produits gazeux, au-dessous de la température minima d'explosion. Avec les corps non volatils, il y a décomposition au-dessous de cette même limite. Dans la pratique, ces décompositions aux températures relativement basses sont souvent extrêmement utiles à connaître, car elles règlent la stabilité de la substance explosive. Dans le cas des cotons-poudres, elles ont fait l'objet d'un très grand nombre de recherches expérimentales.

Si on se propose d'étudier l'action de la chaleur sur les explosifs, on se trouve donc en face d'un problème fort complexe. Nous allons rapporter les résultats des recherches que nous avons exécutées sur ce sujet, dans le cas du plus important des explosifs d'amorçage, le fulminate de mercure.

A. — Températures d'explosion du fulminate de mercure

La mesure de la température d'explosion du fulminate de mercure a fait l'objet d'un certain nombre de travaux. Pour les raisons indiquées précédemment, les nombres publiés sont tout à fait discordants. BERTHELOT (10) trouve 187°, WÖHLER et METTER (3) indiquent 190° si on chauffe le fulminate brusquement et 160-165° si on chauffe lentement (élévation de température de 5° par minute). HOITSEMA (11) signale d'autre part qu'en élevant très lentement la température (de 100 à 133° en 40 minutes), le fulminate peut détoner à 133°. Enfin TAFFANEL, DAUTRICHE, DURR et PERRIN (5) ont étudié, à température constante, l'explosion de la poudre électrique B (fulminate de mercure du commerce). Ils ont obtenu l'explosion dès 142°, et mesuré pour diverses températures, comprises entre 142° et 214°, les retards d'explosion.

Nous avons repris ces mesures en projetant une petite quantité de

fulminate (aussi constante que possible et voisine de 0 gr. 1), sur la surface d'un bain de mercure* maintenu à température constante.

Le dispositif expérimental utilisé était le suivant :

Un récipient cylindrique en fonte, de 25 cm. de profondeur, contient du mercure jusqu'à 10 cm. du bord environ. Il est calorifugé avec de l'amiante, et fermé par un couvercle également en amiante. Le récipient repose sur un trépied et le chauffage est assuré par un bec Bunsen. On règle le débit du gaz à l'aide d'une pince à vis. L'ensemble de l'appareil est protégé des courants d'air par un écran en tôle. Avec le chauffage au gaz, il est possible d'obtenir, à certaines heures de la journée, une température constante à 1° près, pendant plus d'une heure.

Les mesures les plus nombreuses ont été faites en utilisant la substance grise, non recristallisée, contenant 99 % de fulminate pur. Pour déterminer l'influence de la couleur et de la pureté, nous avons également mesuré les températures et les retards d'explosion de la variété blanche recristallisée titrant 99,7 % en fulminate pur et de la variété blanche non recristallisée titrant 98 % en fulminate pur.

Les tableaux I, II, III, IV, V donnent, pour ces différents produits les températures d'explosion (t°C) que nous avons obtenues, avec les retards correspondants (R).

TABLEAU I
FULMINATE GRIS 99 %.

t°C	135	139,5	142	146,5	151
R	39 m.	17 m. 30 s.	10 m. 20 s.	6 m. 25 s.	4 m.
t°C	155	167	173	179	184
R	2 m. 45 s.	1 m. 19 s.	40 s.	27 s.	17 s.
t°C	195	199	214	220	235
R	10 s.	7 s. 1/2	3 s.	2 s.	1 s.
t°C	260	277			
R	1/5 s.	0 s.			

(*) Le mercure est bien préférable aux alliages métalliques facilement fusibles (WOOD, DARCEY), tout au moins aux températures inférieures à 150°.

TABLEAU II

FULMINATE BLANC 99,7 %.

t°C	137,5	148,5	163	172,5	179
R	53 m. 15 s.	12 m.	4 m. 12 s.	1 m. 58 s.	1 m. 10 s.
t°C	187	199	226	235	255
R	45 s.	19 s.	4 s.	2 s. 1/2	3/5 s.
t°C	265	275	287		
R	2/5 s.	1/5 s.	0 s.		

TABLEAU III

FULMINATE BLANC 98 %.

t°C	136°5	148	157	167	177
R	45 m.	8 m.	4 m. 20 s.	2 m. 18 s.	1 m.
t°C	190	201	209	235	283
R	28 s.	12 s.	8 s.	1 s. 1/2	0 s.

TABLEAU IV

TEMPÉRATURES MINIMA D'EXPLOSION AVEC RETARD.

Gris 99 %	Blanc 99,7 %	Blanc 98 %
—	—	—
135°	137°5	136°5

TABLEAU V

TEMPÉRATURES D'EXPLOSION SANS RETARD.

Gris 99 %	Blanc 99,7 %	Blanc 98 %
—	—	—
277°	287°	283°

Les courbes de la *figure 1* représentent les résultats obtenus. On constate que la substance blanche est moins sensible à l'action de la chaleur que la

substance grise; d'autre part, certaines impuretés de la variété blanche abaissent les retards d'explosion. Il est impossible de comparer nos résultats avec ceux obtenus par TAFFANEL, DAUTRICHE, DURR et PERRIN, ces auteurs ne donnant aucun renseignement sur leur produit.

Nous avons étudié l'influence de certains facteurs sur les températures et les retards d'explosion.

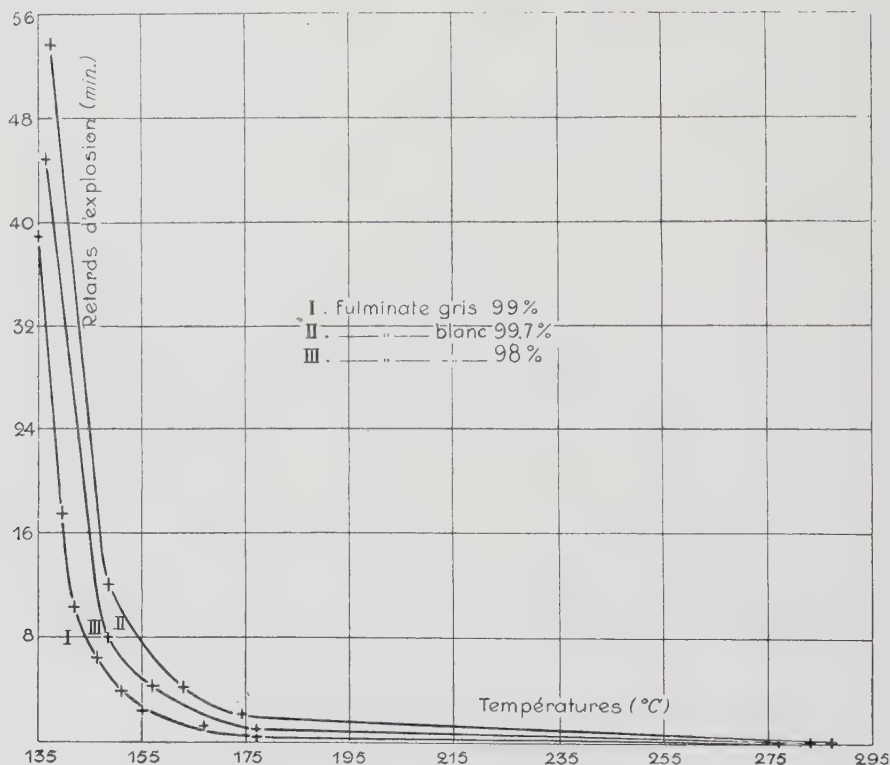


Fig. 1.

La température d'explosion sans retard dépend, dans une large mesure, de la quantité d'explosif utilisée. En opérant avec un gramme de fulminate gris, nous avons obtenu l'explosion dès 128°. En opérant avec 10 gr. de fulminate blanc à 99,7 %, l'explosion se produit dès 115°, avec un retard supérieur à sept heures.

Les retards d'explosion semblent à peu près indépendants de la quantité d'explosif; en tous cas, les variations ne sont pas systématiques.

Les températures et les retards d'explosion sont indépendants de l'état

de division du produit. Nous l'avons vérifié en utilisant le refus du tamis 50 et l'acceptation du tamis 200. Ce résultat est d'ailleurs logique, puisque, d'après l'examen microscopique du fulminate, les grains les plus gros sont composés de petits cristaux enchevêtrés.

Enfin, par le même procédé, nous avons étudié l'explosion du produit obtenu en soumettant le fulminate au rayonnement de la lampe à vapeur de mercure. La substance initiale était le fulminate gris à 99 %, et la durée d'exposition 8 jours (homogénéisation de la masse chaque jour). Voici les résultats obtenus (tableaux VI et VII).

TABLEAU VI

t°C	145	156	157,5	163	207
R	2 m. 30 s.	40 s.	32 s. 1/2	9 s.	1/2 s.
t°C	220	235			
R	1/5 s.	0 s.			

TABLEAU VII

TEMPÉRATURES D'EXPLOSION

avec retard	sans retard
145°	235°

Pour chaque température comprise entre 145° et 235°, le retard d'explosion est moins important pour le produit de décomposition que pour le fulminate. La température d'explosion avec retard est plus élevée, et la température d'explosion sans retard moins élevée que pour le fulminate. Nous avons tracé sur la *figure 2*, les courbes correspondant : 1° au fulminate gris à 99 % avant l'exposition ; 2° à ce même produit, après 8 jours d'exposition.

B. — Décomposition lente et explosion du fulminate de mercure

Le fulminate de mercure chauffé avec précaution se décompose lentement et laisse un résidu jaune-brun inerte. Cette décomposition fut observée pour la première fois par HESS et DIETL (12), en maintenant « pendant

longtemps » du fulminate entre 90 et 95 degrés. Ces auteurs étudièrent le résidu et lui reconnurent les propriétés suivantes : même forme cristalline que le fulminate, difficilement combustible, pas du tout explosif. Ils le considérèrent comme un produit d'isomérisation ou de polymérisation du fulminate.

HOITSEMA (11), en 1896, étudia cette décomposition, et lui attribua les

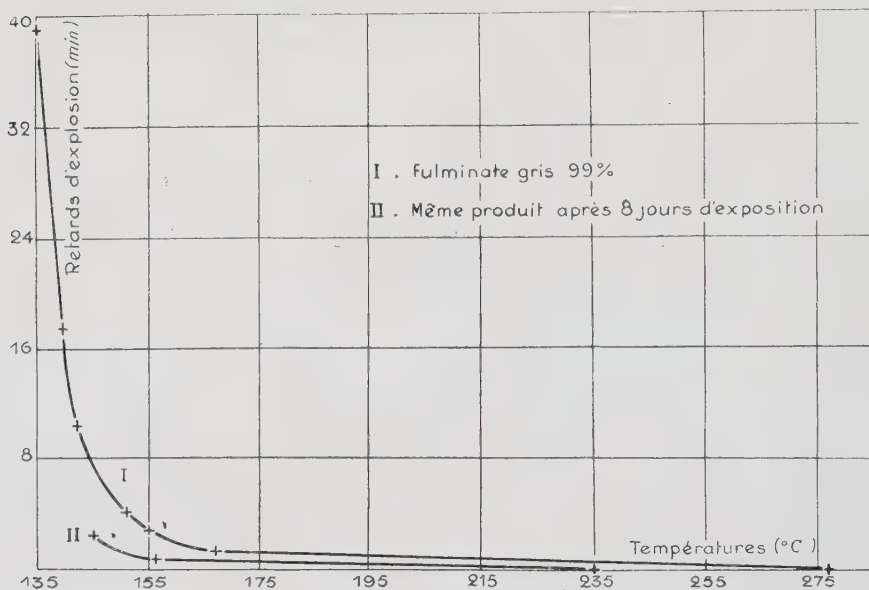


Fig. 2.

caractères suivants : 1° elle a lieu avec dégagement d'oxygène ; 2° elle donne un résidu inerte, qui est de l'oxyde de mercure.

En 1922, à peu près simultanément, LANGHANS (13) et FARMER (14) publièrent chacun un mémoire sur cette question. LANGHANS étudia analytiquement la transformation. Il montra que la proportion en mercure du produit chauffé passe de 70,42 % (fulminate pur) à 76,4 % en 72 heures à 82°. Le produit résiduel est alors insensible à la flamme. L'augmentation de la teneur en mercure est proportionnelle à la durée de chauffe. Le résidu consiste en un mélange de composés mercurieux et mercuriques.

Le mémoire de FARMER contient une étude très sérieuse de la décomposition. Aux températures comprises entre 60° et 100°, et dans le vide de 5 mm. de Hg, il étudia, qualitativement et quantitativement, les gaz dégagés. Après une période assez longue d'initiation, pendant laquelle se

forme un catalyseur, le dégagement gazeux commence. Sa vitesse croît presque jusqu'à la fin de la décomposition, puis tend brusquement vers 0. La décomposition est d'autant plus rapide que l'on opère à température plus élevée. Les gaz dégagés consistent presque exclusivement en CO^2 . La fin de la réaction correspond à un dégagement de 0,58 molécule de CO^2 par molécule de fulminate. En opérant sous une pression de 500 mm. de Hg, FARMER montra en outre que la vitesse de décomposition dépend légèrement de la pression. Elle est un peu plus faible dans ce dernier cas que dans le premier.

Enfin, en 1928, TAMMANN et KRÖGER (9), sans avoir eu apparemment connaissance des mémoires de FARMER et de LANGHANS, et au cours d'une étude plus générale sur les températures d'explosion, arrivèrent aux conclusions suivantes :

1° La décomposition lente du fulminate est due à une oxydation par l'air. Cette idée est étayée par deux faits expérimentaux : a) la limite d'explosibilité du fulminate est abaissée si on le chauffe dans CO^2 et non dans l'air ; b) cette même limite dépend de l'état de division du produit.

2° Le résidu est de l'oxyde de mercure.

Les expériences de TAMMANN et KRÖGER ne nous semblent pas assez probantes pour que l'on puisse mettre en doute les résultats publiés par FARMER, que les nôtres ont confirmés.

Toutes les recherches précédentes ont été faites en décomposant le fulminate à des températures relativement basses (inférieures à 100°). Nous les avons reprises et complétées en étudiant simultanément la décomposition lente et la décomposition explosive aux températures plus élevées. Nous avons cherché à déterminer l'influence de divers facteurs sur ces phénomènes et en particulier celle de la pression dans la chambre d'explosion. A ce sujet, signalons que cette dernière influence n'a jamais été étudiée systématiquement dans le cas des phénomènes explosifs. Récemment cependant W.-E. GARNER et A.-S. GOMM (8) ont montré que dans le vide, la température de détonation de l'azoture de plomb (N^6Pb) peut s'abaisser à 290° et même à 280° après une purge prolongée, alors que dans l'air elle est de 350° . Ces auteurs donnent de ce phénomène l'explication suivante :

1° La perte d'énergie ne s'effectuant que par rayonnement, l'explosif est maintenu à température plus élevée que dans l'air.

2° Les molécules de gaz adsorbées à la surface du cristal doivent entrer en collision avec les molécules d'azote qui se forment, ce qui peut avoir pour effet de diminuer l'énergie de ces molécules d'azote, avant qu'elles

aient eu le temps d'activer les molécules non encore décomposées de $\text{N}^{\circ}\text{Pb}$. L'effet d'un petit nombre de molécules adsorbées peut être considérable, si la réaction suit un processus en chaînes.

DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Même en utilisant de faibles quantités de fulminate de mercure, il ne faut pas songer à les chauffer dans un appareil en verre. Nous nous sommes servis d'un appareil en alliage inoxydable (Uranus 10, Jacob Holtzer).

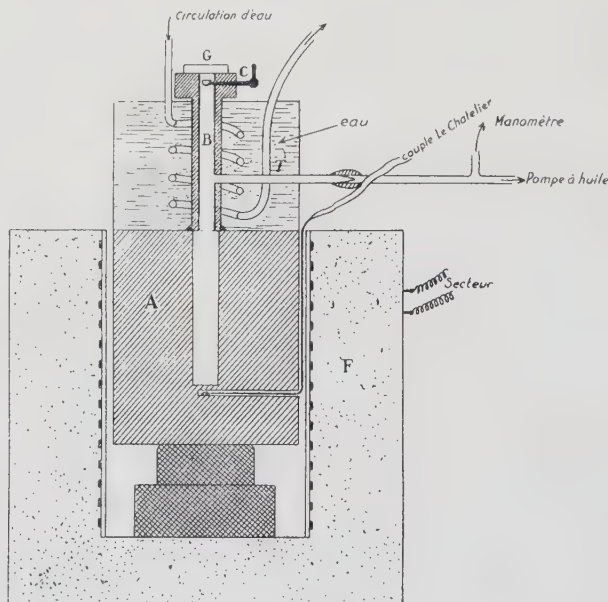


Fig. 3.

La *figure 3* représente schématiquement l'appareillage utilisé.

Dans un bloc cylindrique A, de 15 cm. de diamètre et de 18 cm. de hauteur, est percée une cavité coaxiale cylindrique, de 2 cm. de diamètre et de 13 cm. de profondeur. Un tube B, de 13 cm. de longueur et de 1,5 cm. de diamètre intérieur, est soudé au bloc de façon telle que l'axe du tube prolonge celui de la cavité. Le tube B est percé d'une tubulure latérale T. Il a été aminci sur une longueur de 11 cm. L'épaisseur de ses parois, qui est de 2 cm. pour la partie supérieure, est réduite, partout ailleurs, à 0 cm. 5 seulement. Dans la partie supérieure est percé, latéralement, un trou très légèrement conique, dans lequel peut entrer exactement un bouchon d'a-

cier C. Ce bouchon est prolongé d'un côté par une petite coupelle métallique, destinée à contenir l'explosif, de l'autre par une manette, permettant de le manier facilement. Quand le bouchon est à sa place dans la cavité, la petite coupelle a son centre sur l'axe du tube.

La partie inférieure de l'appareil, c'est-à-dire le bloc A, est introduite entièrement dans un four électrique vertical F. Ce four comprend deux enroulements de ruban de chromel, branchés en parallèles sur le secteur.

Le tube B est entouré d'un manchon d'eau froide. La partie supérieure de l'appareil est donc toujours à la température ordinaire, ce qui permet l'emploi de la graisse à vide pour en assurer l'étanchéité. Aussi, lorsque les expériences sont faites sous des pressions inférieures à la pression atmosphérique, l'appareil est simplement fermé par une glace, posée sur la face supérieure du tube B, recouverte préalablement d'une couche de graisse. C'est de la graisse à vide qui assure également l'étanchéité de la partie constituée par le bouchon C. L'expérience nous a montré que l'on peut aisément, de cette façon, obtenir et conserver un vide de 0 mm. 1 de mercure.

C'est par la tubulure T que l'on règle la pression dans la chambre d'explosion. Une pompe à huile permet d'obtenir un vide de 0 mm. 1 de mercure en quelques secondes. Un manomètre permet de comparer la pression existant dans l'appareil à la pression atmosphérique, mesurée d'autre part à l'aide d'un baromètre. Par un jeu convenable de robinets, on peut aisément introduire, soit de l'air, soit un autre gaz, dans l'appareil.

Comme nos expériences étaient faites à température constante, il était nécessaire de régulariser la tension du courant donné par le secteur. Nous avons utilisé pour cela des lampes à filament de fer dans l'hydrogène [voir à ce sujet HENRY (15)]. Avec trois rhéostats, on arrive assez aisément à régler et à maintenir, à la valeur désirée, l'intensité de courant passant dans le four. La masse thermique considérable permet une constance de la température de l'ordre de un degré.

On mesure la température du fond de la cavité à l'aide d'un couple thermo-électrique chromel-alumel, dont la soudure est distante de quelques millimètres. Le couple pénètre à l'intérieur de l'appareil par un trou latéral percé dans le bloc métallique A.

Marche d'une expérience. — Lorsque le fond de la chambre d'explosion est réglé à la température voulue, la coupelle contenant le fulminate de mercure est fixée à l'extrémité du bouchon C, puis introduite dans l'appareil. On fait le vide à plusieurs reprises, de façon à chasser les produits

gazeux provenant de l'expérience précédente. On établit ensuite la pression désirée et on tourne la manette de 180°. Le fulminate tombe et on note le temps. Le niveau du mercure dans le manomètre permet de suivre le phénomène. Pour une explosion, on observe une très brusque variation du niveau, et le mercure ne prend pas immédiatement sa position d'équilibre. Pour une décomposition simple, le changement de niveau est toujours très lent.

Avec ce dispositif, il est difficile de mettre en jeu une quantité d'explosif bien déterminée. En effet, la coupelle ne se vide jamais complètement et d'autre part, en tombant, une petite quantité de fulminate peut rester collée aux parois de la chambre d'explosion. Comme le facteur quantité d'explosif influe sur certains des phénomènes étudiés, nous avons cherché à opérer sur des quantités aussi constantes que possible d'explosif et les résultats indiqués sont la moyenne d'un assez grand nombre d'expériences. De plus, pour bien définir cette influence, deux séries d'expériences ont été faites, en utilisant deux coupelles de capacités différentes. On peut évaluer à 45 mgr. et 18 mgr., à 5 % près environ, les quantités d'explosif ainsi mises en jeu dans l'un ou l'autre cas.

Toutes les expériences décrites ci-dessous ont été exécutées avec le fulminate gris, titrant 99 % en fulminate pur.

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX OBTENUS EN UTILISANT 45 mgr. D'EXPLOSIF

Nous avons fait varier la température de 110° à 220°, et la pression de 0 mm. 1 de Hg. à 1 atmosphère.

I. — TEMPÉRATURES INFÉRIEURES A 139° 5.

Quelle que soit la pression dans l'appareil, on n'obtient jamais l'explosion du fulminate de mercure. Après un retard que nous appellerons *retard à la décomposition commençante*, une décomposition s'amorce. La vitesse du dégagement gazeux croît alors assez rapidement jusqu'à une certaine valeur, qui reste à peu près constante pendant la plus grande partie de la décomposition. Enfin, assez brusquement, la vitesse de décomposition décroît et devient très faible. Nous considérons la décomposition comme terminée, lorsque le changement de niveau du mercure dans le manomètre est inappréciable au bout d'une heure. Dans ces conditions, nous avons vérifié que les caractères de cette décomposition sont tout à fait analogues à ceux décrits par FARMER (14).

A titre d'exemple, voici (tableau VIII), les résultats obtenus par chauff-

fage à 138° , dans un vide initial de 1 mm. de mercure, en notant en fonction du temps t la pression p dans l'appareil.

TABLEAU VIII

p (mm. Hg)	1	1	2	4	6	8
t (m. et s.)	0	15 m.	19 m.	24 m.	28 m.	31 m 40 s.
p (mm. Hg)	10	12	14	16	17	
t (m. et s.)	35 m 10 s	38 m 40 s	42 m 30 s	46 m 30 s	52 m.	

La courbe 1 de la *figure 4*, obtenue en portant les temps en abscisses et les pressions en ordonnées, représente cette décomposition.

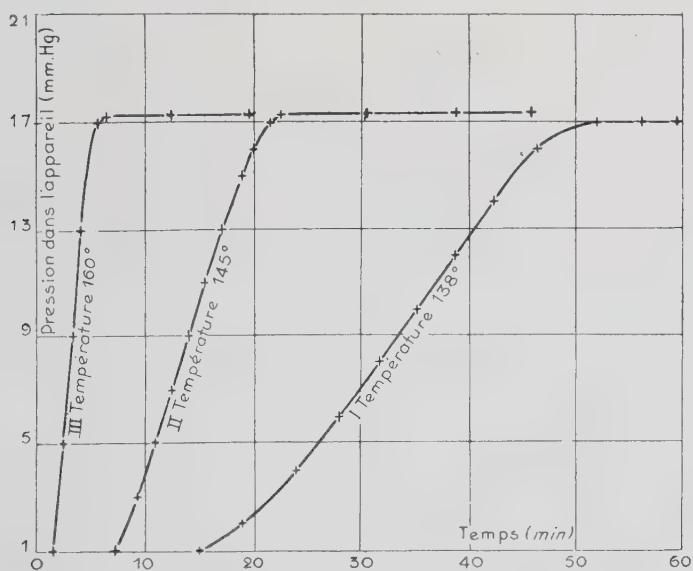


Fig. 4.

La décomposition n'est pas, en réalité, aussi simple que nous venons de l'indiquer. Le dégagement gazeux ne s'arrête jamais complètement si on poursuit le chauffage. Nous n'avons donc considéré qu'une partie, d'ailleurs la plus importante, du phénomène.

Pour la température 123° , nous avons étudié cette décomposition plus complètement, par voie analytique. Au cours d'un chauffage qui a duré

près de 200 heures, nous avons prélevé, à des instants différents, du fulminate décomposé, et mesuré sa teneur en mercure. Le dosage du mercure était effectué à l'état de sulfure HgS. La substance dissoute dans une solution de cyanure de potassium est saturée à froid par H²S. On laisse déposer, puis on filtre sur creuset de Gooch. On lave à l'eau froide, puis on sèche à l'étuve à 120°. Voici les résultats obtenus (Tableau IX).

TABLEAU IX

Durée du chauffage	0	0 h 33 m	3 h	63 h	123 h	183 h
Teneur % en mercure	70,4	70,4	77	78,9	80,3	81,6

La vitesse de décomposition semble donc prendre une valeur à peu près constante. La teneur en mercure variant continuellement, le résidu jaune-brun n'est pas un composé défini.

La fin de la décomposition, correspondant d'après FARMER, à une perte de 0,58 molécule de CO² par molécule de fulminate, doit avoir lieu pour une teneur en mercure égale à 77,4 %. Cette valeur correspond bien d'ailleurs à une diminution considérable de la vitesse du dégagement gazeux.

Quelle que soit sa teneur en mercure, le résidu jaune-brun a les propriétés suivantes. Il est soluble dans l'hyposulfite de soude avec réaction alcaline immédiate. La libération de soude est bien moins considérable que pour le fulminate pur (3/5 environ, après un chauffage de 4 heures à 123°). Il est soluble dans les solutions de cyanure de potassium et d'iodure de potassium. Il laisse cependant, en général, un très léger dépôt noirâtre, qui disparaît à la longue. Ce dépôt est trop peu important, pour pouvoir être étudié. Il semble probable qu'il consiste, comme dans le cas du fulminate décomposé par les rayons de la lampe à vapeur de mercure, en mercure plus ou moins oxydé, produit par une décomposition lente du fulminate suivant la réaction :



Enfin, il est insoluble dans l'ammoniaque et dans la pyridine.

Si on le chauffe rapidement, il se décompose brusquement avec dégagement gazeux, laissant comme résidu une poudre jaune-clair.

Si on le chauffe avec précautions, vers 300-350°, il se modifie lentement. Sa couleur jaune-brun, que l'on pourrait comparer assez exactement à celle

de la terre de Sienne, devient analogue à celle de la terre de Sienne brûlée. Si on continue à chauffer, la masse se fendille et la couleur passe au jaune-citron, puis au blanc. Ce dernier stade correspond peut-être à un composé défini. Malheureusement, en partant de 10 gr. de fulminate, on obtient à peine quelques centigrammes de substance blanche. Nous avons cependant mesuré la teneur en mercure de ce dernier produit. Le dosage à l'état de sulfure de mercure nous a donné comme résultat 72 %.

Notons qu'au cours de toutes ces transformations, la forme cristalline du fulminate reste invariable.

II.— TEMPÉRATURES COMPRISES ENTRE 139° 5 et 172°.

Suivant la pression dans la chambre d'explosion, les phénomènes observés sont différents. *A chaque température, il existe une pression critique au-dessous de laquelle l'explosion ne se produit pas.* Cette pression critique est toujours assez faible (inférieure à 45 mm de Hg). Pour les températures 145°, 160°, 167°, 172°, les tableaux X, XI XII, XIII indiquent en détail les résultats obtenus à différentes pressions.

TABLEAU X

T. = 145° C.

PRESSION en mm. de Hg.	PHÉNOMÈNES OBSERVÉS
748	Explosion après 7 min. de chauffage
550	Explosion après 7 min. 5 sec. de chauffage
45	Explosion après 7 min. de chauffage
40	Au bout de 7 minutes, la décomposition commence. En 8 m. 20 s., la variation de pression dans la chambre d'explosion est égale à 1 mm. de Hg. L'explosion se produit après 8 m. 45 s. de chauffage.
38	Au bout de 7 minutes environ, la décomposition commence. Elle est terminée après 22 m. 30 s. de chauffage. Pas d'explosion.
36	Comme pour 38 mm.
1	Comme pour 38 mm.

TABLEAU XI

T. = 160° C.

PRESSION en mm. de Hg.	PHÉNOMÈNES OBSERVÉS
740	Explosion après 1 min. 50 sec. de chauffage
663	Explosion après 1 min. 50 sec. de chauffage
600	Explosion après 1 min. 50 sec. de chauffage
54	Explosion après 1 min. 43 sec. de chauffage
43	Explosion après 1 min. 45 sec. de chauffage
32	Au bout de 1 m. 45 s. environ, la décomposition commence. En 2 m. 20 s. la variation de pression dans la chambre d'explosion est un peu supérieure à 1 mm. de Hg. L'explosion se produit après 2 m. 25 s. de chauffage.
29	Au bout de 1 m. 45 s. environ, la décomposition commence. En 2 m. 40 s., la variation de pression dans la chambre d'explosion est un peu supérieure à 1 mm. 5 de Hg. L'explosion se produit après 2 m. 40 s. de chauffage.
28	Au bout de 1 m. 45 s. environ, la décomposition commence. Elle est terminée après 6 m. 30 s. de chauffage. Pas d'explosion.
26	} Comme pour 28 mm.
23	
5	
1	

TABLEAU XII

T. = 167° C.

PRESSION en mm. de Hg	PHÉNOMÈNES OBSERVÉS
742	Explosion après 1 min. 15 sec. de chauffage
340	Explosion après 1 min. 12 sec. de chauffage
27	Explosion après 1 min. 10 sec. de chauffage
21	Explosion après 1 min. 10 sec. de chauffage
16	Après 1 m. 10 s., la décomposition commence. En 1 m. 45 s., la variation de pression dans la chambre d'explosion est égale à 3 mm. L'ex- plosion se produit après 1 m. 47 s. de chauff- fage.
15	Au bout de 1 m. 10 s., la décomposition com- mence. Cette décomposition est terminée après 4 min. de chauffage. Pas d'explosion.
6	} Comme pour 15 mm.
4	
1	

TABLEAU XIII

T. = 172° C.

PRESSION en mm. de Hg	PHÉNOMÈNES OBSERVÉS
740	Explosion après 45 sec., sans décomposition préa- lable apparente.
2	Explosion après 45 sec., sans décomposition préa- lable apparente.
0,2	Au bout de 43 sec., la décomposition com- mence. Elle est terminée après 2 m. 30 s. de chauffage. Pas d'explosion.

La pression critique est donc d'autant plus faible que la température est plus élevée: elle décroît de 41 mm. de Hg à 0,2 mm. quand la température croît de 140°5 à 172° (tableau XIV).

TABLEAU XIV

Température (° C)	140,5	145	160	167	172
Pression critique (mm. de Hg)	41	39	28	15	0,2

Notre appareil ne permet pas d'opérer sous des pressions inférieures à 0,1 mm. de Hg. mais, d'après l'allure de la courbe représentée par la *figure* 5, il semble bien que la température pour laquelle la pression critique disparaît est voisine à 172°

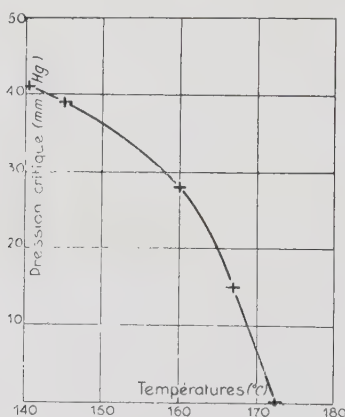


Fig. 5.

Pour les valeurs de la pression inférieures à la pression critique, le fulminate subit une décomposition lente, tout à fait analogue à celle observée et décrite pour les températures inférieures à 139° 5.

Nous avons résumé sur les tableaux XV et XVI, les résultats obtenus en chauffant le fulminate, sous une pression initiale de 1 mm. de Hg., aux températures 145° et 160°.

TABLEAU XV

Pression dans l'appareil (mm. de Hg)	1	1	3	5	7	9
Temps	0	7 m 15 s	9 m 20 s	10 m 55 s	12 m 25 s	14 m
Pression dans l'appareil (mm. de Hg)	11	13	15	16	17	17,3
Temps	15 m 35 s	17 m 5 s	19 m	20 m	21 m 30 s	22 m 30 s

TABLEAU XVI

Pression dans l'appareil (mm. de Hg)	1	1	3	5	7	9
Temps	0	1 m 30 s	2 m 5 s	2 m 35 s	3 m	3 m 20 s
Pression dans l'appareil (mm. de Hg)	11	13	15	17	17,2	
Temps	3 m 40 s	4 m 5 s	4 m 50 s	5 m 40 s	6 m 20 s	

Les courbes II et III de la *figure 4*, relatives à ces expériences, ont été obtenues en portant les pressions en ordonnées et les temps en abscisses.

Les retards d'explosion du fulminate sont indépendants de la pression pour les valeurs de celle-ci comprises entre la pression atmosphérique et une valeur un peu supérieure à la pression critique. Ils vont en croissant quand on passe de cette dernière valeur à la pression critique.

Les retards à la décomposition commençante sont indépendants de la pression et, aux températures supérieures à 145° , à peu près égaux aux retards d'explosion à la pression ordinaire (En réalité, comme nous le montrons plus loin, la décomposition commence toujours un peu avant l'explosion mais notre dispositif n'est pas suffisamment sensible pour mettre ce fait en évidence). On n'observe donc la décomposition commençante que pour les valeurs de la pression légèrement supérieures à la pression critique. Cependant, aux températures inférieures à 145° , les retards d'explosion

croissent quand la température baisse, bien plus vite que les retards à la décomposition commençante.

Par exemple, à 139° 5, nous avons obtenu, en opérant sous la pression atmosphérique, les résultats indiqués sur le tableau XVII.

TABLEAU XVII

Variation de la pression dans l'appareil (mm. de Hg)	0	0	0,5	2,5	4,5	Explo- sion
Temps	0	9 m	12 m	15 m	17 m	18 m

La décomposition commence après 9 minutes de chauffage, et l'explosion se produit après 18 minutes seulement.

III. — TEMPÉRATURES SUPÉRIEURES A 172° .

L'explosion du fulminate se produit quelle que soit la pression dans l'appareil. Dans ce cas, les retards d'explosion dépendent, dans une certaine mesure, de cette pression.

Les résultats obtenus aux températures 184° et 192° sont reproduits sur les tableaux XVIII et XIX.

TABLEAU XVIII

T. = 184° C.

PRESSIONS en mm. de Hg.	PHÉNOMÈNES OBSERVÉS			
744	Explosion après un retard de 17 s.			
374	—	—	—	17 s.
102	—	—	—	17 s.
25	—	—	—	17 s.
12	—	—	—	18 s. 5
7	—	—	—	20 s.
3	—	—	—	23 s.
1	—	—	—	29 s.
0,1	—	—	—	32 s.

TABLEAU XIX

T. = 192° C.

PRESSIONS en mm. de Hg.	PHÉNOMÈNES OBSERVÉS
743	Explosion après un retard de 11 s.
340	— — — 11 s.
140	— — — 11 s.
47	— — — 11 s.
20	— — — 11 s.
9	— — — 13 s.
3,5	— — — 15 s.
0,1	— — — 19 s.

Les courbes de la *figure 6* représentent ces résultats, les pressions étant portées en abscisses et les retards en ordonnées.

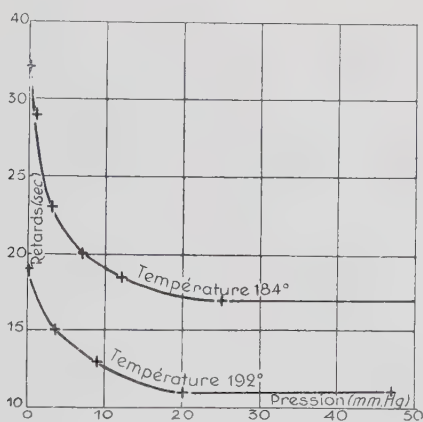


Fig. 6.

Sous les pressions de 745 mm. de Hg (pression atmosphérique) et de 0,2 mm. de Hg, les retards d'explosion mesurés pour différentes températures comprises entre 173° (température d'explosion avec retard sous la pression 0,2 mm.) et 220° sont donnés par le tableau XX.

TABLEAU XX

Températures (°C)	173	184	192	195	199
Retards (sec.) sous la pression 745 mm.	40	17	11	10	7,5
Retards (sec.) sous la pression 0,2 mm.	70	31	19	16	11
Températures (°C)	202	207	220		
Retards (sec.) sous la pression 745 mm.	6	4	2		
Retards (sec.) sous la pression 0,2 mm.	9	5	2		

Les résultats indiqués sur le tableau précédent sont représentés sur les courbes de la *figure 7*, où les retards sont portés en ordonnées et les températures en abscisses.

On peut remarquer que les retards d'explosion restent indépendants de la pression, jusqu'à des pressions assez faibles et d'autant plus basses que la température est plus élevée. Les courbes de la *figure 7* tendent à se rejoindre, d'ailleurs assez rapidement, et à 220° on n'observe plus de différence entre le retard sous la pression atmosphérique et le retard sous la pression 0,2 mm. de mercure.

INFLUENCE DE LA QUANTITÉ D'EXPLOSIF ET DE DIVERS AUTRES FACTEURS

Les expériences faites en utilisant la petite coupelle, avec des quantités d'explosifs voisines de 18 mgr., ont donné des résultats quelquefois légèrement différents des précédents.

En comparant les chiffres obtenus dans ces deux séries d'expériences, on arrive aux conclusions suivantes :

1° L'allure générale des phénomènes ne dépend pas de la quantité d'explosif utilisée.

2° Aux températures et aux pressions pour lesquelles l'explosion est

possible; les retards d'explosions varient peu avec la quantité d'explosif, et en tous cas les différences observées ne sont pas systématiques.

3° La température d'explosion avec retard sous la pression atmosphérique est d'autant plus élevée que la quantité d'explosif est plus faible. Quand celle-ci passe de 45 mgr. à 18 mgr., la température varie de 140° à 155°.

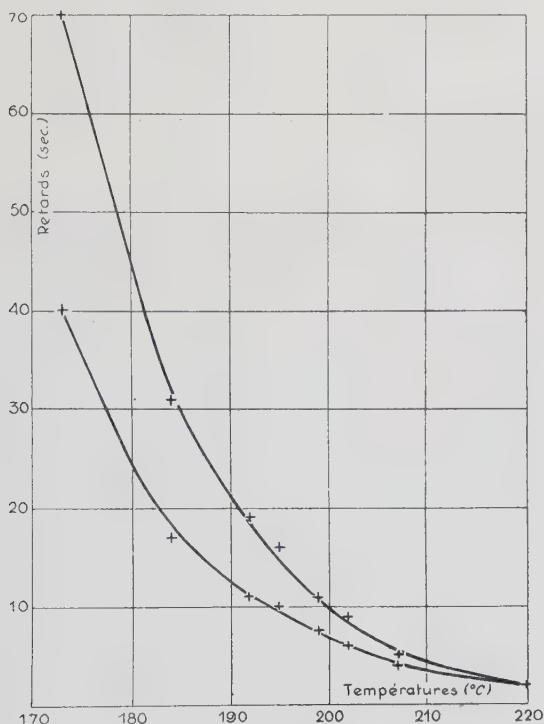


Fig. 7

La courbe supérieure correspond à la pression 0,2 mm. de Hg.
La courbe inférieure correspond à la pression atmosphérique.

4° Il en est de même de la température d'explosion avec retard sous une pression donnée. Pour la pression 0,1 mm. de Hg, cette température passe de 172 à 180°, quand la quantité de fulminate varie de 45 à 18 mgr.

5° Aux températures et aux pressions où l'explosion est impossible, les caractères de la décomposition lente sont indépendants de la quantité d'explosif, mais le volume des gaz dégagés lui est proportionnel.

Les conclusions 2 et 3 sont d'accord avec les résultats obtenus par WÖHLER et MARTIN pour la détonation des *azotures* (4).

La dernière conclusion est conforme aux résultats obtenus par FARMER aux températures inférieures à 100° (14).

Lors de nos déterminations de la température d'explosion sous la pression atmosphérique, décrites dans la première partie de ce chapitre, l'influence du facteur quantité d'explosif nous avait semblé moins importante que dans ces dernières expériences. La cause est sans doute dans la manière dont se trouvait disposé le fulminate sur la surface chauffée. Dans nos premières expériences il formait un petit tas, tandis que dans les expériences actuelles il constituait une couche couvrant tout le fond de la chambre d'explosion. Il est probable que l'influence de la quantité se fait surtout sentir pour les faibles épaisseurs.

Influence de la nature du milieu gazeux. — D'après TAMMANN et KRÖGER (9), la limite inférieure d'explosibilité du fulminate est inférieure dans le gaz carbonique à ce qu'elle est dans l'air et la décomposition lente est due à une oxydation par l'oxygène de l'air. Les expériences de TAMMANN et KRÖGER font donc prévoir une influence de la nature du milieu gazeux sur tous les phénomènes étudiés précédemment. Nous avons cherché à mettre cette influence en évidence, en utilisant tour à tour l'air, l'azote du commerce (1 à 2 % d'oxygène) et l'oxygène du commerce (1 à 2 % d'azote).

En opérant avec 45 mgr. de fulminate, nous avons tout d'abord constaté que la température d'explosion avec retard sous la pression atmosphérique reste fixée à $139^{\circ} 5$, quelle que soit la nature du milieu gazeux.

Au-dessous de $139^{\circ} 5$ la décomposition lente du fulminate se produit, quelles que soient la nature du gaz et la pression dans l'appareil. Les caractères (en particulier la vitesse) de cette décomposition ne dépendent pas de la pression en oxygène que nous avons fait varier de 700 mm. de Hg à 0,002 mm. de Hg. Il semble donc impossible d'admettre, comme TAMMANN et KRÖGER, une influence quelconque de l'oxygène de l'air sur cette décomposition.

Au-dessus de $139^{\circ} 5$, tous les phénomènes observés ne dépendent que de la température et de la pression totale dans l'appareil.

Influence des gaz résiduels. — Après chaque expérience, nous prenons toujours soin d'évacuer les gaz dégagés, soit par l'explosion, soit par la décomposition lente. Nous nous sommes demandés quelle pouvait être leur influence sur l'opération suivante. Une série d'expériences nous a facilement montré que cette influence est tout à fait négligeable.

Influence des anti-détonants. — Nous avons utilisé le plus efficace des anti-détonants : le plomb tétréthyle en solution dans le dibromure d'éthyle et le monochloronaphtalène. Contrairement à ce que l'on pouvait supposer, ce composé a une influence nettement pro-détonante. Vaporisé dans la chambre d'explosion, il abaisse notablement la température d'explosion avec retard et diminue aussi les retards d'explosion. L'étude systématique de ce phénomène n'entrant pas dans notre programme de recherches, nous citerons seulement l'expérience suivante :

La quantité de fulminate utilisée étant voisine de 0 gr. 3, la température minima d'explosion est égale à 130°. En présence de plomb tétréthyle, cette température est abaissée à 123°. Le retard d'explosion (1 heure environ à 130° pour le fulminate dans les conditions ordinaires), est réduit à 5 minutes à 123°, en présence de plomb tétréthyle.

Remarque sur la propagation de la flamme dans la chambre d'explosion. — Quand la pression dans l'appareil est supérieure à quelques centimètres de mercure, la flamme produite par l'explosion est assez peu visible et on retrouve dans la coupelle, intact, le fulminate non renversé. Au contraire, dans le cas des faibles pressions, on voit une flamme plus lumineuse se propager dans la chambre d'explosion, tout le fulminate restant dans la coupelle est décomposé, celle-ci se recouvrant d'une couche de mercure. Que la concavité de la coupelle soit dirigée vers le bas ou vers le haut de l'appareil, il ne reste jamais de fulminate non décomposé.

C. — Transformation du fulminate de mercure sans dégagement gazeux

Si on mélange du fulminate de mercure avec une faible quantité du produit jaune-brun, inerte, obtenu par décomposition complète de cet explosif, on peut, en comparant les retards d'explosion du mélange à ceux du fulminate, constater que le mélange est moins sensible à l'action de la chaleur que le fulminate pur. Le produit de décomposition jouant le rôle de matière inerte, ce résultat est d'ailleurs tout à fait logique. Au contraire, si on chauffe du fulminate de mercure jusqu'à décomposition partielle, le produit obtenu est encore explosif et nous avons constaté qu'il est plus sensible à l'action de la chaleur que le fulminate.

Nous avons rapporté, sur le tableau XXI, quelques résultats obtenus

au cours de ces expériences préliminaires exécutées avec la variété blanche recristallisée (99,7 % en fulminate).

TABLEAU XXI

Températures	Retards d'explosion du fulminate	Retards d'explosion d'un mélange de fulminate et de produit inerte	Retards d'explosion du fulminate partiellement décomposé
199°	19 s.	21 s.	2 s. 1/5
187°	45 s. 1/2	49 s.	4 s. 1/2
177°	1 m. 10 s.	1 m. 15 s.	7 s.

Nous avons ensuite dissous le produit de décomposition partielle dans l'ammoniaque. Une partie seulement est soluble, le résidu comprenant la fraction décomposée. Après filtration, nous avons précipité par l'acide acétique du fulminate blanc. Ce dernier ne se distingue pas analytiquement (titration d'après BROWNSDON, dosage du mercure) du fulminate blanc recristallisé obtenu directement (99,7 %). Nous avons mesuré les retards d'explosion de cette substance.

Les résultats obtenus à 199° et à 190° pour différents produits sont donnés par le tableau XXII.

TABLEAU XXII

Températures	Retards d'explosion du fulminate A (blanc 99,7 %)	Retards d'explosion du fulminate A décomposé partiellement (produit B)	Retards d'explosion du produit obtenu par dissolution de B et reprécipitation
199°	19 sec.	2 s. 1/5	5 s.
190°	35 sec.	4 s.	8 s.

Après dissolution dans l'ammoniaque et précipitation par l'acide acétique, le fulminate partiellement décomposé est donc encore plus sensible à l'action de la chaleur que le fulminate préparé directement.

Etant donné le rapport étroit qui existe nécessairement entre ces phénomènes et la nature du retard d'explosion, nous en avons entrepris l'étude systématique en utilisant la substance grise titrant 99 % en fulminate pur.

Une coupelle contenant une quantité de fulminate constante et voisine de 0 gr. 3 est descendue dans la chambre d'explosion où elle est maintenue à une température constante θ , pendant un temps t . La température θ est choisie inférieure à la température d'explosion avec retard. On prépare de cette façon une série d'échantillons correspondant à $t = 3, 5, 10, 15...$ etc... minutes de chauffage. Ensuite on mesure à une température constante et très supérieure à la température d'explosion avec retard du fulminate pur, les retards d'explosion de ces divers échantillons.

Les tableaux suivants donnent les retards enregistrés à 183° pour deux séries d'échantillons. La première série provient d'un chauffage à 133°, la seconde d'un chauffage à 123°.

TABLEAU XXIII

Fulminate chauffé à 133° pendant un temps t .

Retards à la température 183°.

t (minutes)	R (secondes)
—	—
0	20
5	18
10	15
15	10,5
20	6
25	4,5
30	3
35	2,5
43	2
50	2
60	2
85	2
102	non explosif

La transformation du fulminate en un produit plus explosif commence donc dès le début du chauffage. Elle se produit sans dégagement gazeux. La quantité de fulminate transformé croît avec le temps. Cette transformation est indépendante de la décomposition avec dégagement de CO^2

TABLEAU XXIV

Fulminate chauffé à 123° pendant un temps t .

Retards à la température 183° .

t (minutes)	R (secondes)
0	20
3	19,5
5	19
10	17
15	14
20	10
25	8
30	6
35 1/2	4,5
45	3
60	2,5
70	2,2
80	2
100	2
157	pas d'explosion à 183° mais explosion très faible à 210°
180	pas explosif

qui ne commence que bien longtemps après le début du chauffage (33 minutes à 123°). Aucune différence physique ou chimique n'a pu être constatée entre le fulminate de mercure et le produit obtenu par chauffage à 123° pendant 30 minutes. L'analyse attribue aux deux substances la même teneur en mercure, et la réaction de BROWNSDON la même teneur en fulminate pur. Peut-être s'agit-il encore d'une isomérisation ou d'une polymérisation du fulminate.

Les résultats des deux tableaux précédents sont représentés sur les courbes de la *figure 8* obtenues en portant en abscisses les durées de chauffage t et en ordonnées les retards d'explosion.

Pour les valeurs de t supérieures au retard à la décomposition commençante, la violence de l'explosion diminue notablement quand t augmente. Pour les valeurs de t précédant immédiatement celle pour laquelle l'explosion n'est plus possible, on obtient, au lieu d'une véritable explosion, une décomposition rapide, mais très peu violente, sans flammes et avec dégagement de fumées blanches.

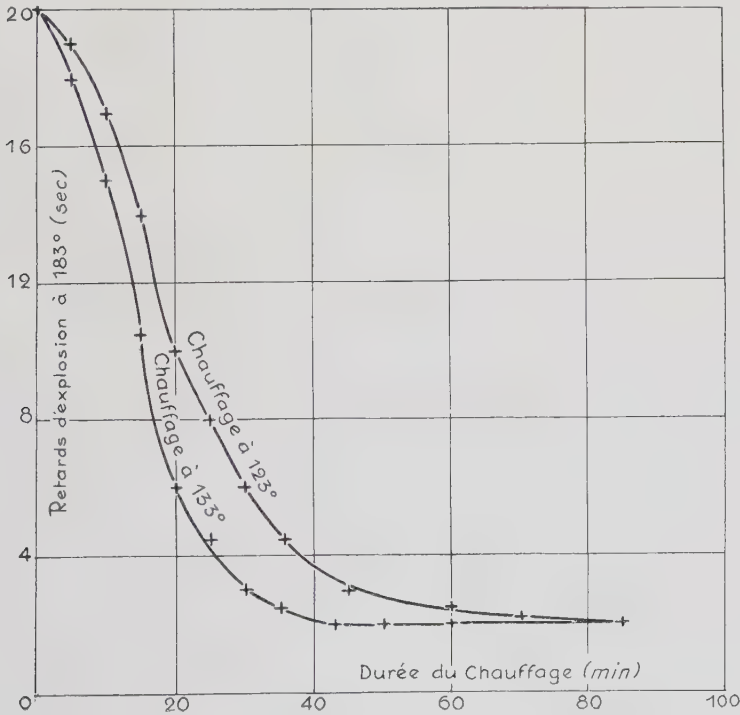


Fig. 8.

La température d'explosion avec retard croît rapidement avec t , tout au moins pour les valeurs de t supérieures au retard à la décomposition commençante. Par exemple elle passe de 140 à 174° quant t passe de 0 à 80 minutes à 123°.

Remarque. — Si on produit sur le bain de mercure l'explosion de fulminate partiellement décomposé, on peut remarquer après l'opération que la surface du mercure est recouverte d'une poudre jaune clair, analogue à

celle que l'on obtient en chauffant fortement le produit de décomposition jaune-brun du fulminate*. C'est la haute température de l'explosion qui a produit instantanément cette transformation. Même en opérant avec du fulminate frais, le bain de mercure est toujours recouvert d'une très mince couche de poudre jaune. Le retard à la décomposition commençante est donc toujours plus faible que le retard d'explosion, nous n'avons pu observer cette différence au manomètre.

Nous avons chauffé, pendant un même temps t , des quantités égales de fulminate.

- 1° dans l'air sous la pression atmosphérique ;
- 2° dans l'oxygène sous la pression atmosphérique ;
- 3° dans l'azote, sous la pression atmosphérique et sous la pression 1/5 mm. Hg.

La pression du gaz n'a aucune influence sur l'explosibilité du produit obtenu. Au contraire, le chauffage sous pression réduite donne naissance à un produit légèrement moins sensible à l'action de la chaleur que celui obtenu par chauffage sous la pression atmosphérique.

NATURE DU RETARD D'EXPLOSION

Afin de préciser la nature du retard d'explosion, nous avons, à diverses températures situées dans la zone d'explosion avec retard, fait l'expérience suivante :

Une coupelle contenant le fulminate est chauffée à la température T , pendant un temps t_1 . Après refroidissement, on mesure le temps t_2 nécessaire pour obtenir l'explosion à cette même température T . On compare les différentes valeurs obtenues pour $t_1 + t_2$ à la valeur mesurant le retard d'explosion normal. On obtient les résultats suivants (tableaux XXV, XXVI, XXVII).

TABLEAU XXV

$T. = 187^{\circ} \text{ C.}$

t_1 (sec)	t_2 (sec.)	$t_1 + t_2$ (sec)
—	—	—
0	16	16
5	14	19
10	11	21
13	9	22

(*) Voir page 40.

TABLEAU XXVI

T. = 141° C.

t_1	t_2	$t_1 + t_2$
0	15 m 50 s	15 m 50 s
6 m 55 s	13 m 25 s	20 m 20 s
11 m	12 m 30 s	23 m 30 s

TABLEAU XXVII

T. = 139° C.

t_1	t_2	$t_1 + t_2$
0	19 m	19 m
15 m	9 m 40 s	24 m 40 s

Ces résultats montrent que somme $t_1 + t_2$ est d'autant plus élevée que t_1 est plus grand. Pendant le retard à l'explosion, concurremment à la transformation du fulminate, la température de l'explosif s'élève probablement au-dessus de celle du thermostat. Ce fait peut être dû en partie à un caractère exothermique de cette transformation.

Pour le fulminate de mercure, la nature du retard d'explosion est donc bien plus complexe que l'indique la théorie exposée au début de ce chapitre. Il est probable que cette théorie n'est d'ailleurs valable que pour des cas particulièrement simples. La nature du retard d'explosion pouvant dépendre de décompositions ou de transformations indépendantes de la décomposition explosive proprement dite, une étude particulière est nécessaire pour fixer la nature de ce phénomène pour chaque explosif.

D. — Températures d'explosion

de l'Hexaméthylènetriperoxydediamine

Etant donné l'intérêt que peut présenter, comme explosif d'amorçage, l'hexaméthylènetriperoxydediamine (H. M. T. D.), nous avons déterminé, avec le même dispositif que pour le fulminate de mercure, ses températures d'explosion. Une quantité constante et égale à 0 gr. 03 d'explosif est projetée sur la surface du bain de mercure maintenu à température constante. On constate que dans un certain intervalle de température, l'H. M. T. D. explose avec un retard d'autant plus important que la température est plus élevée. Les résultats obtenus sont portés sur le tableau XXVIII.

TABLEAU XXVIII

Températures (t°C)	235	215	200	195	185
Retards (sec.)	0	1/5	2/5	3/5	1
t° C	170	160	153	145	143
R (sec.)	2 1/2	6	11	21	26
t°C	138	137	134	133	
R (sec.)	40	43	75	85	

Température minimum d'explosion
avec retard

133°

Température d'explosion
sans retard

235°

Maintenu à une température inférieure à 133°, l'H. M. T. D. disparaît lentement de la surface du mercure en dégageant une odeur forte et désagréable.

Les résultats portés sur le tableau précédent sont représentés sur la courbe de la *figure 9*, où les retards sont portés en ordonnées et les températures en abscisses.

En *résumé*, dans ce chapitre, nous avons d'abord rapporté les résultats de nos déterminations de la température d'explosion du fulminate de mercure, les mesures antérieures étant notablement discordantes. Nos expériences étaient *faites à température constante* (sous la pression atmosphérique). Ce n'est qu'à partir et *au-dessus de 277°* (pour le fulminate gris) et 287° (pour la variété blanche) que l'explosion est instantanée. Au-dessous de cette température, elle ne se produit qu'après un retard d'autant plus grand que la température est plus basse. Dans le cas du fulminate gris, *la température minima d'explosion est 135°, après un retard de 39 min.* (0 gr. 1 de fulminate environ). Dans certains cas (10 gr. de fulminate), cette température d'explosion peut être *abaissée jusque vers 115°*, après un retard de 7 heures. Ce phénomène du retard à l'explosion permet d'expliquer les divergences entre les résultats des précédents auteurs. Au cours de ces expériences, nous avons pu mettre en évidence que *le fulminate blanc est moins explosif que la variété grise*. D'ailleurs, il faut noter que la présence d'impuretés en modifie les propriétés explosives.

Ces résultats nous ont conduit à étudier, sous diverses pressions, l'ac-

tion de la chaleur sur le fulminate. *Au-dessous de $139^{\circ} 5$ (pour 45 mgr. d'explosif), on obtient jamais d'explosion.* On observe une décomposition lente tout à fait analogue à celle étudiée par FARMER aux températures inférieures à 100° . *Entre $139^{\circ} 5$ et 172° il existe une pression critique, fonction de la température, au-dessous de laquelle on n'observe jamais d'explosion;* il se produit alors une simple décomposition, comme dans le cas

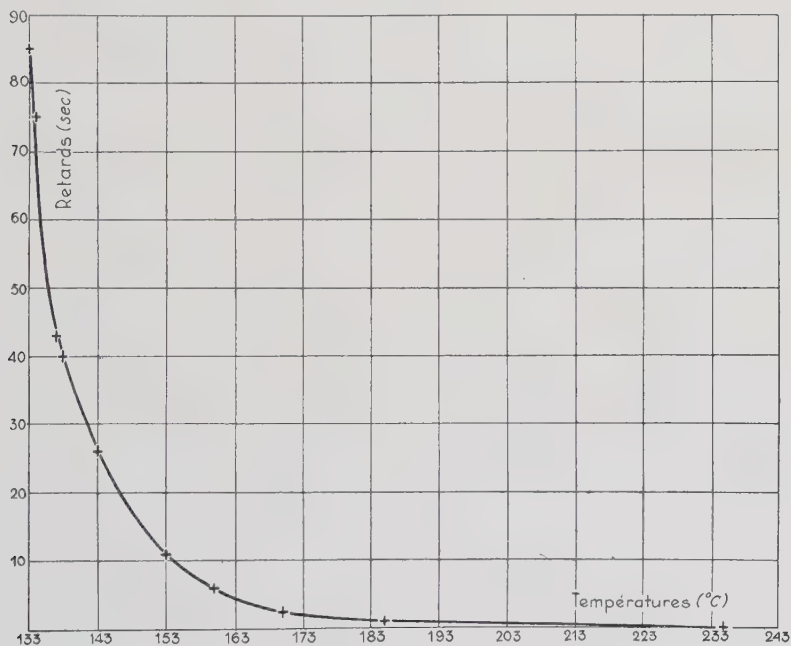


Fig. 9.

précédent. Enfin, au-dessus de 172° , l'explosion a toujours lieu, quelle que soit la pression dans l'appareil, mais après un retard qui dépend de la pression initiale. Il faut noter que *la nature du milieu gazeux n'a aucune influence* sur les résultats précédents.

Dans les expériences rapportées dans la troisième partie de ce chapitre, nous avons mis en évidence la formation, sans dégagement gazeux, d'un produit que l'analyse ne permet pas de distinguer du fulminate, et beaucoup plus explosif que celui-ci. Le retard à l'explosion est partiellement consacré à cette transformation.

Enfin l'hexaméthylènetriperoxydédiamine a fait l'objet de quelques mesures de températures d'explosion. Les retards d'explosions ont été mesurés à diverses températures.

CHAPITRE III

LA FORMATION DE L'ONDE EXPLOSIVE DANS LES EXPLOSIFS D'AMORÇAGE

Au cours du chapitre précédent, nous avons toujours employé pour désigner la décomposition brutale sous l'action de la chaleur des petites quantités de fulminate de mercure, le terme *explosion*. On considère généralement cette décomposition comme une détonation et la possibilité d'une simple combustion du fulminate de mercure n'a jamais été envisagée. Cependant, les expériences suivantes semblent indiquer différents modes possibles pour la décomposition brutale de cet explosif.

Lorsqu'on chauffe rapidement une petite quantité de fulminate de mercure (environ 0 gr. 1) sur du papier, au-dessus de la flamme d'un bec Bunsen, on obtient une décomposition violente de l'explosif. En opérant avec précautions, il est possible d'éviter l'inflammation du papier par la flamme du Bunsen. On peut remarquer après l'explosion que si le papier est recouvert d'une mince couche de mercure partiellement oxydé, il est resté intact à tout autre point de vue. Ce résultat a été obtenu même avec du papier Joseph de 0 mm. 04 d'épaisseur.

Au contraire, 0 gr. 1 d'azoture de plomb (N^6Pb), chauffé non plus sur du papier Joseph, mais sur une feuille de nickel de 0 mm. 3 d'épaisseur, produit dans la plaque métallique un trou dont le diamètre est d'environ un centimètre.

D'autre part, lorsqu'on décompose du fulminate sous l'action d'un choc, on perçoit un bruit incomparablement plus violent que lorsqu'on produit sa décomposition par élévation de température. On n'obtient rien de semblable dans le cas de l'azoture de plomb, même en opérant sur de très faibles quantités d'explosif, par exemple de l'ordre du milligramme. D'ailleurs GARNER et GOMM (1) ont signalé qu'en chauffant dans une petite

coupelle en platine un cristal unique d'azoture de plomb pesant environ 0 gr. 003, ils obtenaient une décomposition suffisamment violente pour briser la coupelle.

Ces expériences préliminaires, exécutées avec des quantités d'explosif inférieures au décigramme, nous ont permis de faire les hypothèses suivantes :

1° Le mode de la décomposition explosive des petites quantités de fulminate de mercure est différent suivant que cette décomposition est produite par un choc ou par action de la chaleur.

2° L'azoture de plomb ne peut se décomposer que suivant un seul mode, qui est vraisemblablement, en raison de la violence de l'explosion, une détonation.

Pour vérifier ces hypothèses, et d'une façon générale, pour déterminer la nature de l'explosion, il nous a paru intéressant de faire appel à la méthode d'enregistrement chronophotographique.

APPAREILS UTILISES

Le dispositif expérimental utilisé est identique à celui employé par LAFFITTE (2) et dont nous avons déjà, au début de ce mémoire, indiqué le principe. Sur la *figure 10*, on peut voir la manière dont sont disposés tous les appareils. Nous nous bornerons à une description rapide en renvoyant au mémoire de LAFFITTE, pour plus de détails.

Le papier sensible au gélatino bromure d'argent est appliqué sur la surface d'un cylindre en carton C, d'axe horizontal, et de 24 cm de diamètre, dont la rotation est assurée par un moteur électrique. Ce cylindre est enfermé dans une boîte servant de chambre noire. On peut le faire tourner, grâce à un jeu de moteurs et de rhéostats convenables, à des vitesses variant entre 1 et 50 tours par seconde (1 tour du cylindre correspond à un déplacement linéaire du papier sensible de 75 cm.). La vitesse de déplacement du film est mesurée sur le papier enfumé d'un tambour T (mû par un mouvement d'horlogerie M₁), en comparant deux courbes parallèles tracées par les aiguilles e₁ et e₂ de deux signaux de Marcel DEPREZ; l'une inscrit le nombre de tours du cylindre photographique, l'autre les vibrations d'un diapason entretenu et dont la période est 1/100 de seconde. Connaissant le nombre de tours effectués par le cy-

lindre pendant que le diapason a vibré un certain nombre de fois, on en déduit aisément la vitesse de translation du papier enroulé sur le cylindre.

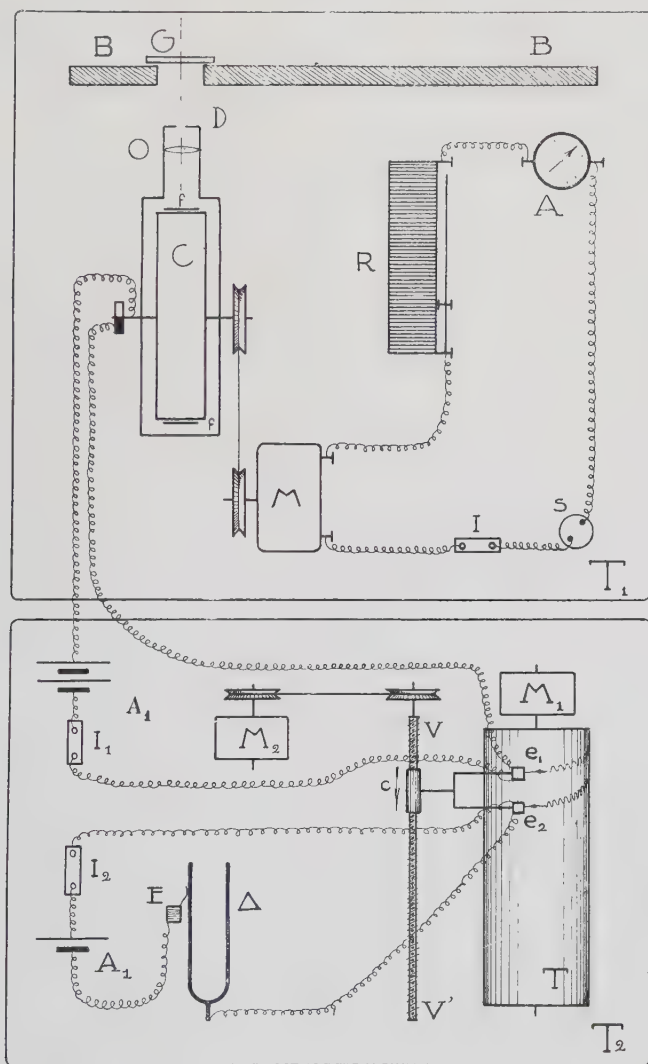


Fig. 10.

Tous les appareils sont protégés des effets de l'explosion par un bouclier B en bois. Une glace sans tain G est disposée devant l'objectif. L'explosif est placé à 2 ou 3 mètres en avant du cylindre photographique, sur un

rail de voie normale. Ce rail est horizontal et rivé à deux supports métalliques très lourds. Il est disposé parallèlement à l'axe du cylindre photographique et à la même hauteur.

Avant chaque série d'expériences, on s'assure du parallélisme entre l'axe du cylindre et la surface du rail par une photographie préliminaire.

A. — Décomposition explosive sous l'action de la chaleur et du choc

L'explosif était disposé à l'air libre suivant une traînée de faible section parallèle à l'axe du cylindre de l'appareil photographique. Sa décomposition était produite, suivant les cas, soit par un choc (détonateur dont l'explosion était provoquée par une amorce électrique), soit par une simple élévation locale de température (flamme d'un cordeau Bickford).

I. — *Fulminate de mercure*. — 1° En utilisant un détonateur, on obtient toujours la détonation complète du fulminate. La *figure 11* a été ainsi obtenue en provoquant la détonation d'une traînée de fulminate de 40 cm. de longueur, 1 cm. de largeur et 0 cm. 5 de hauteur, à l'aide d'un détonateur n° 7 (1 gr. 5 de fulminate). Dans ce cas, la vitesse de détonation mesurée est d'environ 2.500 m/sec. Le film se déplaçait, dans le sens de la flèche*, à une vitesse de l'ordre de 30 mètres par seconde.

2° En utilisant la flamme d'un cordeau Bickford, on obtient une *combustion*. Suivant les dimensions de la traînée, cette combustion peut ou non (et d'ailleurs plus ou moins rapidement) se transformer en une *détonation*. Les conditions de cette transformation seront étudiées plus loin. En tous cas, l'étude photographique montre que l'action de la chaleur produit toujours une combustion simple et non une détonation du fulminate de mercure. Les phénomènes indiqués au chapitre II comme relatifs à l'explosion se rapportent donc, plus exactement, à la combustion. Les températures d'explosion sont par conséquent des températures d'*inflammation* ou de *déflagration*. La *figure 12* représente l'inflammation d'une traînée de fulminate de 40 cm. de longueur, de 5 mm. de largeur et de 4 mm. de hauteur. Dans ces conditions, la combustion s'est propagée à une vitesse de quelques mètres par seconde, sans donner naissance à une détonation. Notons que pour obtenir une photographie de dimensions convenables, nous avons dû

(*) Toutes les photographies publiées dans ce mémoire sont les reproductions directes des négatifs; la flèche indique toujours le sens de déplacement du film.

réduire considérablement la vitesse de déplacement du film (de 30 à 5 m/sec. environ).



Fig. 12. — Combustion d'une traînée de fulminate de mercure de 5 mm. de largeur et de 4 mm. de hauteur, amorcée par la flamme d'un cordeau Bickford.



Fig. 11. — Détonation d'une traînée de fulminate de mercure amorcée par un détonateur.

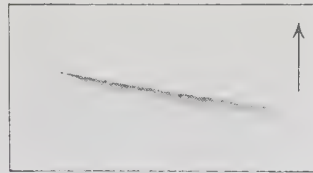


Fig. 13. — Détonation d'une traînée d'azoture de plomb amorcée par la flamme d'un cordeau Bickford.



Fig. 14. — Détonation d'une colonne de peroxyde de tricycloacétone contenu dans un tube de verre et amorcée par un détonateur.

II. — *Azoture de plomb.* — Les mêmes expériences ont été exécutées en utilisant l'azoture de plomb. La conclusion qui s'en dégage est très nette. Dans tous les cas, même en opérant sur de très faibles quantités d'explosif, il y a *détonation*. Le *figure 13* a été obtenue en provoquant avec la

flamme d'un cordon Bickford l'explosion d'une mince trainée d'azoture de plomb (40 cm. de longueur, 5 mm. de largeur et 3 mm. de hauteur). Il est impossible de saisir une période de transition. La flamme provoque la détonation normale, à vitesse constante, dès le début de la trainée. La vitesse de déplacement du film étant encore voisine de 30 m./sec. la vitesse de détonation est de l'ordre de 2.000 m/sec.

La décomposition brutale sous l'action de la chaleur de petites quantités d'azoture de plomb est donc, contrairement à ce qu'on observe pour le fulminate de mercure, une détonation. Les températures d'explosion mesurées par différents auteurs sont, dans ce cas, des températures de détonation.

Il résulte de cette étude, exécutée sur les deux principaux explosifs d'amorçage, que :

1° La décomposition explosive produite par un choc violent (détonateur) est toujours une *détonation*.

2° La décomposition explosive produite par une élévation de température (flamme) est une *combustion* dans le cas du fulminate de mercure, et une *détonation* dans le cas de l'azoture de plomb.

Suivant les caractères de l'explosion produite par élévation de température, on peut alors classer les explosifs d'amorçage en deux catégories :

1° Ceux qui se comportent comme le fulminate de mercure ;

2° Ceux qui se comportent comme l'azoture de plomb.

Nous avons pu vérifier expérimentalement que, dans la première catégorie, on peut ranger : l'*hexaméthylènetriperoxydediamine* et, dans une certaine mesure, le *peroxyde de tricycloacétone*. Dans la seconde, on peut ranger les *azotures de cuivre et d'argent*, ainsi que le *fulminate d'argent*.

Cas particulier du peroxyde de tricycloacétone. — En général, la nature de l'explosion (combustion ou détonation) sous l'action de la chaleur, ne dépend pas de la température à laquelle se trouve porté l'explosif. En tous cas, il semblerait logique de penser que l'élévation de température favorise la détonation au détriment de la combustion. Le peroxyde de tricycloacétone est, à cet égard, une exception particulièrement intéressante.

Nous avons étudié l'action de la chaleur sur cet explosif, en en projetant de faibles quantités (0 gr. 005 environ) sur un bloc Maquenne. Suivant la température du bloc, on obtient des résultats différents. Le tableau I les reproduit aussi fidèlement que possible.

TABLEAU I

TEMPÉRATURE du bloc	RÉSULTATS OBSERVÉS
—	—
jusqu'à 97° (97° est le point de fusion)	Sublimation lente.
97° à 245°	Fusion, puis volatilisation.
245° à 250°	Période trouble, suivant les cas : a) combustions avec flamme fuligineuse, b) détonations violentes, c) décompositions peu violentes, sans flamme, intermédiaires entre les deux phénomènes précédents.
250° à 285°	<i>Détonations violentes.</i>
285° à 305°	Période trouble, tout à fait analogue à celle que l'on a observé entre 245° et 250°.
au-dessus de 305°	<i>Combustions pures et simples</i> avec flamme fuligineuse.

Donc, suivant la température du bloc, le peroxyde de tricycloacétone détone ou brûle, et la température nécessaire pour obtenir la détonation est inférieure à celle nécessaire pour obtenir la combustion. Nous n'avons pas trouvé d'explication théorique bien satisfaisante de ce phénomène. A partir de 250°, le retard d'explosion est faible (au plus quelques secondes). Il décroît rapidement pour s'annuler vers 300°. On peut supposer que, pendant le retard, le peroxyde de tricycloacétone se transforme, à certaines températures, en un autre produit détonant, lui, sous l'action de la chaleur. Malheureusement, en raison de la brièveté du retard, nous n'avons pu vérifier cette hypothèse.

Il aurait été intéressant d'étudier photographiquement l'explosion du peroxyde de tricycloacétone. Malheureusement sa détonation est très peu lumineuse. Même en opérant avec des quantités importantes d'explosif, on n'obtient que des résultats médiocres. La photographie reproduite sur la *figure 14* a été prise en amorçant, à l'aide d'un détonateur, une colonne de cet explosif contenue dans un tube de verre de 15 mm. de diamètre. Nous avons vérifié directement que la flamme d'un cordeau Bickford amorce dans les traînées de peroxyde de tricycloacétone une combustion et non une détonation, ce qui justifie le rapprochement que nous avons fait entre ce corps et fulminate de mercure.

Remarques sur les propriétés explosives du fulminate de mercure. — 1° A

la suite de son exposition à la lumière ultra-violette de la lampe à vapeur de mercure, le fulminate explose au choc de moins en moins violemment. Après un mois d'exposition, il est impossible de le faire détoner en le frappant avec un marteau sur l'enclume. On observe seulement une combustion tout à fait analogue à celle que l'on obtient par élévation de température.

2° En chauffant modérément le fulminate, on obtient de même un produit qui explose au choc de moins en moins violemment. Nous avons résumé, dans le tableau II, les résultats obtenus en chauffant le fulminate à 133° pendant un temps *t*.

TABLEAU II

<i>t</i>	CARACTÈRES DE L'EXPLOSION au choc
0 à 20 min. (20 minutes correspondant à la décomposition commençante)	Détonation violente.
20 min. à 50 min.....	Détonation de moins en moins violente.
50 min. à 80 min.....	Combustion.
au-dessus de 80 min.....	Inerte au choc.

Chauffé à 133°, le fulminate ne devient incombustible qu'après 100 minutes de chauffage. C'est ce qui explique le résultat trouvé par HESS et DIETL (3) avec du fulminate chauffé « pendant longtemps » à 90-95° : « non explosif et difficilement combustible ».

B. — Combustion et formation de l'onde explosive dans les explosifs d'amorçage

Dans le cas des mélanges gazeux explosifs, la combustion et le passage de la combustion à la détonation ont été souvent étudiés. Outre les travaux de MALLARD et LE CHATELIER, déjà signalés, il faut citer en particulier ceux de DIXON (4) et de LAFFITTE (5). Avec les explosifs solides, au contraire, ces phénomènes n'ont fait, jusqu'à ce jour, l'objet que d'un très petit nombre de recherches expérimentales.

La propagation de la combustion a été bien étudiée dans le cas des poudres balistiques. Nous empruntons à JOUGUET (6) la description des phénomènes observés par les différents auteurs.

« Si on enflamme une traînée de poudre, le feu se propage très vite à la surface des grains ; puis les grains continuent à brûler à partir de leur surface. C'est la vitesse avec laquelle la combustion se propage de la périphérie vers le centre, qui constitue la *célérité* de la déflagration. La propagation du feu à la surface est *l'inflammation*. Elle a lieu sous l'influence des gaz chauds produits, qui chassés par leur expansion, vont porter la flamme aux divers points qu'ils touchent. Sa vitesse — *vitesse d'inflammation* — est beaucoup plus grande que celle de la combustion. Elle atteint 2 à 3 m/sec., à l'air libre, pour la poudre noire dont la *vitesse de combustion*, toujours à l'air libre, est de 1 à 2 cm/sec. »

D'autre part BECKER (7) a entrepris l'étude de la combustion des explosifs solides. Le résultat principal de ses recherches a été de montrer par des photographies, que dans la combustion, les gaz de la décomposition s'échappent en sens inverse de la direction de propagation de la flamme.

Le mécanisme de la formation de l'onde explosive par ignition dans les explosifs solides, est resté inconnu. Les recherches sur cette question ne peuvent d'ailleurs s'exercer que dans un cadre assez limité, car la plupart des explosifs (explosifs secondaires) ne peuvent pas, en général, être amenés directement à détoner sous l'action d'une flamme. Il faut donc opérer avec des explosifs d'amorçage.

Les seules recherches se rapportant à cette question sont à notre connaissance, celles de KÆSTER (8), exécutées au cours d'un travail plus général sur l'amorçage. Malheureusement, il ne s'en dégage aucune conclusion bien nette.

En l'absence de résultats expérimentaux, on suppose généralement que le passage de la combustion à la détonation suit un processus analogue à celui observé dans le cas des mélanges gazeux explosifs.

Nous avons appliqué à l'étude de ces phénomènes la méthode d'enregistrement chrono-photographique.

EXPLOSIFS D'AMORÇAGE DU TYPE AZOTURE DE PLOMB

Nous avons montré, dans la première partie de ce chapitre, que pour un certain nombre d'explosifs d'amorçage dont le type est l'azoture de plomb, la décomposition brutale, sous l'action de la chaleur, consiste en une détonation pure et simple.

Pour ces composés, le problème de la formation de l'onde explosive se

trouve donc immédiatement résolu. Le régime détonant prend naissance par simple action de la flamme, et se transmet de proche en proche dans toute la masse d'explosif (*figure 13*).

EXPLOSIFS D'AMORÇAGE DU TYPE FULMINATE DE MERCURE

Dans le cas des explosifs du type fulminate de mercure, l'action de la chaleur produisant une simple combustion, c'est à partir de la combustion même que l'onde explosive prend naissance. Nous avons étudié ce phénomène en détail avec le fulminate de mercure, pur, ou mélangé soit avec du tétryl soit avec du sable fin.

CAS PARTICULIER DU FULMINATE DE MERCURE.

Le fulminate de mercure bien sec, était disposé sur le tréteau d'explosion, soit à l'air libre, en trainées ayant la forme d'un parallépipède rectangle, soit en colonnes, dans des tubes de verre.

Pour obtenir des trainées de section constante et bien rectangulaires, nous avons utilisé des moules en bois, exactement calibrés, dans lesquels on dispose le fulminate et que l'on retire, avant d'enflammer le cordeau Bickford. On obtient de cette façon, tout au moins pour les hauteurs inférieures à 1 cm. et les largeurs supérieures à 0 cm. 5, une précision très satisfaisante.

Les trainées avaient généralement une longueur de 50 cm. environ. Pour certaines expériences seulement, cette longueur a été portée à 1 m. La densité de chargement était sensiblement constante et égale à 1,25*. Afin de rendre les photographies plus claires, un écran en bois était disposé sur le tréteau d'explosion, de façon à masquer les phénomènes lumineux secondaires qui pouvaient se produire en arrière de la trainée.

D'après ce qui a été exposé précédemment, deux interprétations différentes peuvent être données des photographies représentant les combustions.

1° Comme avec les poudres balistiques, il se produit une inflammation superficielle des grains de fulminate par les gaz chauds. La vitesse de cette inflammation étant supérieure à la vitesse de combustion proprement dite, l'inclinaison de la tangente à l'image du front de la flamme donne la vi-

(*) Cette densité était mesurée en dehors des expériences sur des trainées analogues. Nous avons vérifié que, quelles que soient les dimensions du moule utilisé, elle était constante et égale à 1,25 (2 ou 3 % près environ).

tesse d'inflammation et non la vitesse de combustion. Les photographies obtenues ne donnent, dans ce cas, aucun renseignement sur la vitesse de combustion.

2° L'inflammation superficielle des grains ne se produit pas, ou tout au moins sa vitesse est inférieure à la vitesse de combustion. L'image photographique correspond, dans ce cas, à la propagation par conductibilité thermique de la combustion. La vitesse mesurée du front de la flamme est la vitesse de combustion.

Il nous est impossible de faire un choix bien motivé entre ces deux interprétations. Nous donnerons donc le nom de combustion à l'ensemble des phénomènes enregistrés, en spécifiant que ce terme peut englober, le cas échéant, l'ensemble de deux phénomènes distincts : l'inflammation par gaz et la combustion proprement dite. D'ailleurs, étant donné la finesse des grains de fulminate, si la première hypothèse était exacte, la combustion se réduirait à peu près à l'inflammation et, dans certaine mesure, il y aurait confusion entre les deux phénomènes.

Résultats expérimentaux. — Suivant les dimensions de la trainée, l'onde explosive peut ou non prendre naissance.

1° *L'onde explosive ne prend pas naissance.* — Les photographies obtenues sont à peu près analogues à celles que l'on observe dans le cas des mélanges gazeux explosifs ; dès l'allumage, la flamme se propage dans l'explosif à une vitesse très faible et croissante (période initiale d'inflammation). Cette première période intéresse 1 ou 2 cm. seulement de la trainée. La vitesse de combustion atteint rapidement une valeur de régime qui demeure à peu près constante tout le long de la trainée.

2° *L'onde explosive prend naissance, après une combustion plus ou moins longue suivant les dimensions de la trainée.* On constate sur les photographies qu'il n'y a pas continuité entre la vitesse de propagation de la combustion et celle de l'onde explosive, phénomène analogue à celui qui se produit dans les mélanges gazeux. *L'onde explosive s'amorce dans une partie de la masse déjà en combustion depuis un temps plus ou moins long.* C'est seulement au moment où l'onde explosive rejoint le front de la flamme qu'il y a, dans la trainée, une détonation pure et simple. Ces derniers phénomènes ne se présentent pas dans les mélanges gazeux, où, au contraire, il peut arriver que l'onde explosive prenne naissance en un point, avant que la flamme y parvienne. D'autre part, comme dans les mélanges gazeux, une *onde rétrograde* prend naissance en même temps que

l'onde explosive. Cette onde achève vers l'arrière la décomposition du fulminate partiellement brûlé. L'intersection des images de ces deux ondes permet de déterminer le point précis où naît l'onde explosive.

Nous avons mesuré, en fonction de la section S , et cela pour différentes valeurs de la hauteur h et de la longueur l de la trainée :

1° La distance d entre le début de la trainée et la tranche dans laquelle l'onde explosive prend naissance.

2° Le temps t nécessaire pour la combustion totale d'une tranche de la trainée.

3° La durée D de la combustion précédant la détonation, dans la tranche où naît l'onde explosive.

4° La vitesse moyenne V de combustion.

5° La vitesse V_1 de détonation.

Les tableaux III, IV, V, reproduisent les résultats obtenus.

TABLEAU III

h (mm.)	6	6,8	8,1	10	11,8
l (mm.)	5	5	5	5	5
s (mm ²)	30	34	40,5	50	59
d (cm.)	l'onde explosive ne se forme pas	9,3	7,3	4,6	3,3
t (1/1000 sec.)	13				
D (1/1000 sec.)	»	4	2	1,5	0,4
V (m./sec.)	14,3	18,5	20	18	22
V_1 (m./sec.)	»	2350	2450	2600	2700

Il résulte de ces mesures :

1° La distance d est fonction, non seulement de la section de la trainée, mais, pour une valeur donnée de S , elle est d'autant plus grande que h est plus petit.

TABLEAU IV

h (mm.)	5	5	5	5	5	5	5
l (mm.)	5	6	7	8	10	12	15
s (mm ²)	25	30	35	40	50	60	75
d (cm.)	l'onde explosive ne se forme pas	l'onde explosive ne se forme pas	25	14,3	9,3	6	4
t (1/1000 de sec.)	14,5	15	14				
D (1/1000 de sec.)	»	»		7,5	7	4	1
V (m./sec.)	10,7	11,7	14,1	13,65	16	20	18
V_1 (m./sec.)	»	»	2250	2500	2500	2600	2700

TABLEAU V

h (mm.)	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
l (mm.)	10	13	15	20	30
s (mm ²)	27,5	35,75	41,25	55	82,5
d (cm.)	l'onde explosive ne se forme pas	33,3	21,3	12	10
t (1/1000 de sec.)	18	16	14,5		
V (m./sec.)	8,5	10,3	11,5	16	16
V_1 (m./sec.)	»	2250	2350	2700	2800

2° Pour des sections égales ou inférieures à 30 mm², l'onde explosive ne se forme pas, quelles que soient les valeurs de h et de l , même si l'on opère avec des trainées de 1 m. de longueur.

3° Le temps t nécessaire à la combustion totale d'une tranche de la trai-



Fig. 16. — Inflammation par cordeau
Bickford d'une trainée de fulmi-
nate

$h = 5 \text{ mm.}$ $l = 5 \text{ mm.}$

Combustion sans formation d'onde
explosive.



Fig. 17. — Inflammation par cordeau
Bickford d'une trainée de fulmi-
nate

$h = 6 \text{ mm.}$ $l = 5 \text{ mm.}$

Combustion sans formation d'onde
explosive.

née varie avec S , h et l . Le tableau III montre que les variations de t sont semblables à celles de la distance d .

4° Les résultats concernant la vitesse de combustion semblent peu nets, surtout pour les grandes valeurs de S . Cela est dû au fait que nous avons mesuré des vitesses moyennes, sur des périodes de combustion de durées différentes. On peut cependant affirmer que cette vitesse varie avec la section et les dimensions de la trainée: elle est d'autant plus grande que S et h sont plus grands.

5° La vitesse de l'onde explosive ne dépend que de la section (cette vitesse n'est connue qu'à 5 % près environ).

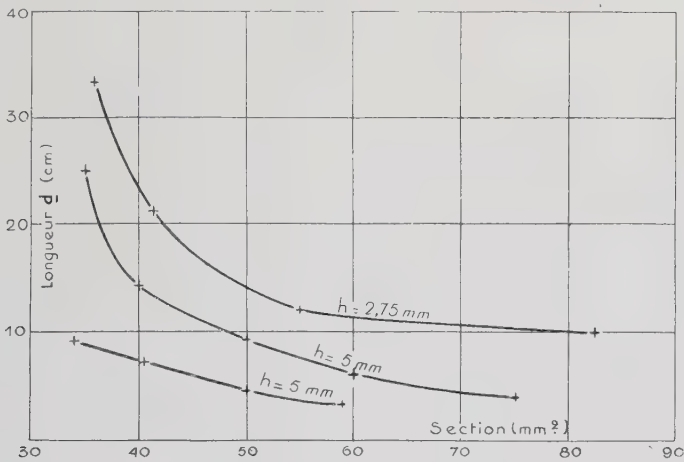


Fig. 15.

Les courbes de la figure 15 représentent, pour différentes valeurs de l et de h , les variations de la distance d (en ordonnée) en fonction de la section S (en abscisse).

Enfin, nous avons fait quelques expériences avec des trainées de fulminate subissant une brusque variation de section. Après la naissance de l'onde explosive, la détonation se propage dans toute la trainée, même si la section devient bien inférieure à 30 mm².

Description des photographies. — Les figures 16 et 17 sont relatives à la combustion de trainées de fulminate de 50 cm de longueur, et dont la section (25 à 30 mm²) était trop faible pour que l'onde explosive prenne naissance. On remarquera la très grande luminosité de la combustion du fulminate de mercure, au moins égale à celle du mélange de sulfure de

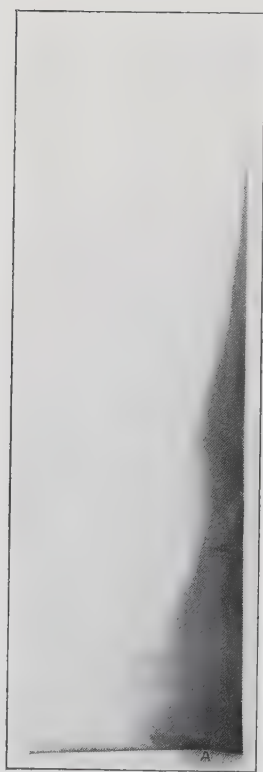


Fig. 18. — Inflammation par cordeau Bickford d'une trainée de fulminate

$h = 2,75$ mm. $l = 20$ mm.

Combustion, puis formation de l'onde explosive. $d = 12$ cm.

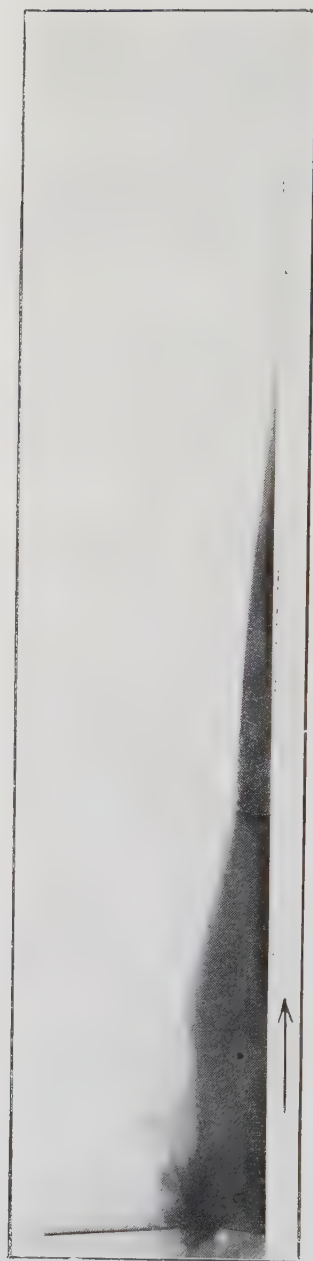


Fig. 19. — Inflammation par cordeau Bickford d'une trainée de fulminate

$h = 2,75$ mm. $l = 30$ mm.

Combustion, puis formation en Δ de l'onde explosive. $d = 10$ cm.

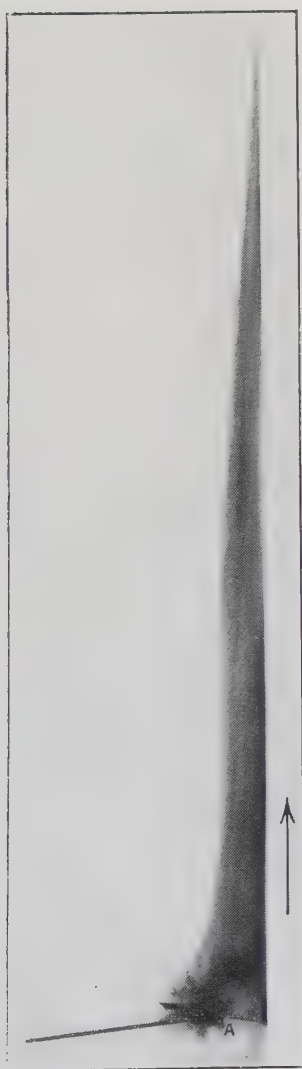


Fig. 20. — Inflammation par cordeau Bickford d'une trainée de fulminate

$h = 6,8 \text{ mm.}$ $l = 5 \text{ mm.}$

Combustion, puis formation en A de l'onde explosive. $d = 9 \text{ cm.}$

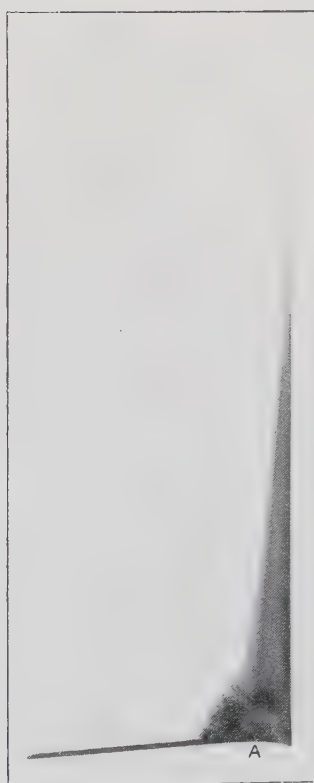


Fig. 21. — Inflammation par cordeau Bickford d'une trainée de fulminate

$h = 8,1 \text{ mm.}$ $l = 5 \text{ mm.}$

Combustion, puis formation en A de l'onde explosive. $d = 7 \text{ cm.}$ 3

carbone et d'oxygène. La vitesse de déplacement du film n'était que de 2 m. 75 par seconde pour la figure 16, et de 1 m. 90 pour la figure 17, de manière à avoir des photographies de dimensions convenables. Cette vi-

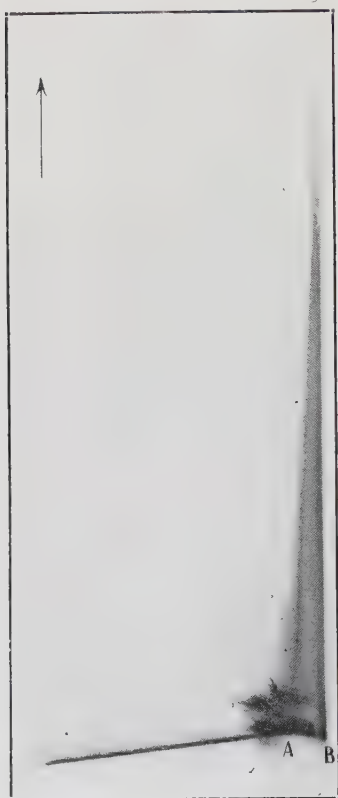


Fig. 22. — Inflammation par cordeau Bickford d'une traînée de fulminate

$h = 9,5$ mm. $l = 5$ mm.

Combustion, puis formation en A de l'onde explosive. $d = 5$ cm.

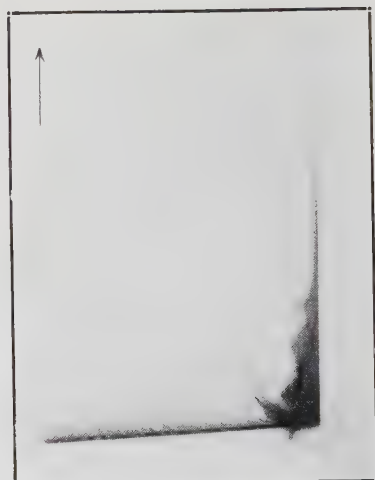


Fig. 23. — Inflammation par cordeau Bickford d'une traînée de fulminate

$h = 5$ mm. $l = 15$ mm.

Combustion, puis formation de l'onde explosive. $d = 4$ cm

tesse peu considérable explique le faible développement apparent de la période initiale d'inflammation par rapport aux photographies suivantes, pour lesquelles la vitesse de déplacement du film était plus grande (figure 19 : 13 m. 15 par seconde; figure 20 : 22 m. 80 par seconde).

Les figures 18, 19, 20, 21, 22, et 23 sont relatives (pour différentes valeurs de h et de l), à la combustion, puis à la détonation, de trainées de section suffisamment grande pour que l'onde explosive prenne naissance. Sur ces photographies, on voit très bien la naissance de l'onde explosive en A, dans une tranche de la trainée déjà en combustion. L'onde rétro-

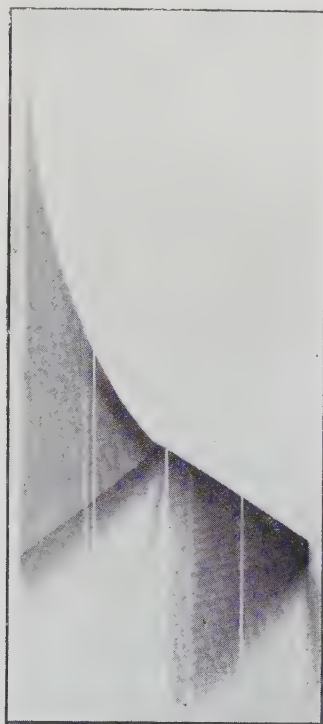


Fig. 24. — Formation de l'onde explosive dans un tube de 43 mm. de diamètre (mélange $\text{CS}^2 + 3 \text{O}^2$).

grade est également très nette, en particulier sur les figures 20, 21 et 22 (A B).

Sur toutes les photographies, on remarque, à l'endroit où l'onde explosive rejoint le front de la flamme, une perturbation très lumineuse. Nous n'avons pu trouver d'explication satisfaisante de ce fait.

Il faut noter que ces photographies correspondent à des valeurs souvent très différentes de la vitesse de rotation du cylindre photographique.

Enfin, il nous a paru intéressant de reproduire, sur la *figure 24*, une photographie extraite du mémoire de LAFFITTE (2), et montrant la combustion, puis la formation de l'onde explosive dans un mélange de soufre de carbone et d'air. Cette photographie permet de comparer les deux phénomènes dans les gaz et dans les explosifs solides.

Colonnes de fulminate de mercure dans des tubes de verre. — Nous avons photographié les phénomènes provoqués par l'inflammation à l'aide d'un cordeau Bickford, de colonnes de fulminate contenues dans des tubes de verre de différents diamètres. Quel que soit le diamètre du tube, la période de combustion précédant la formation de l'onde explosive est à peine visible sur les photographies, et en tout cas elle est bien trop faible pour pouvoir être étudiée.

La formation de l'onde explosive est incomparablement plus rapide qu'à l'air libre.

CAS PARTICULIER DES MÉLANGES DE FULMINATE DE MERCURE ET DE TÉTRYL.

Nous avons étudié photographiquement l'inflammation, à l'aide d'un cordeau Bickford, de mélanges, aussi homogènes que possible, de fulminate de mercure et de tétryl, contenus dans des tubes de verre de 8 mm. 5 de diamètre intérieur. La longueur du tube de verre était de 40 cm environ. En faisant varier la teneur en fulminate, nous avons obtenu les résultats résumés dans le tableau VI.

TABLEAU VI

TENEUR EN FULMINATE %	RÉSULTATS
0 à 20	La combustion ne se propage pas dans le mélange.
20 à 80	La combustion se propage, mais sans donner naissance à une onde explosive. Pour une teneur en fulminate voisine de 20 %, la vitesse de cette combustion est de l'ordre du mm./sec.
80 à 100	La combustion donne naissance à une onde explosive après une période de combustion d'autant plus importante que la teneur en tétryl est plus élevée.

La *figure 25* est relative à un mélange contenant 70 % de fulminate de mercure. La combustion très lumineuse est à peu près analogue à celles obtenues avec des trainées de fulminate pur.

La *figure 26* correspond à un mélange contenant 85 % de fulminate. L'onde explosive naît après 20 cm. environ, dans une tranche déjà en combustion. On n'observe pas, dans ce cas, d'onde rétrograde. La faible teneur du mélange partiellement brûlé en fulminate ne permet pas sa propagation.

La *figure 27* correspond à un mélange contenant 90 % en fulminate. L'onde explosive naît après quelques centimètres seulement.

CAS PARTICULIER DES MÉLANGES DE FULMINATE DE MERCURE ET DE SABLE.

Nous avons également étudié photographiquement l'inflammation des mélanges de fulminate de mercure et de sable. Les tubes de verre utilisés avaient encore 8 mm. 5 de diamètre intérieur. Le sable était passé au tamis 100.

Suivant la teneur en fulminate du mélange, nous avons obtenu les résultats suivants (tableau VII).

TABIEAU VII

TENEUR EN FULMINATE %	RÉSULTATS
0 à 15	La combustion ne se propage pas dans le mélange.
15 à 55	La combustion se propage dans le mélange, mais sans donner naissance à l'onde explosive. Pour une teneur en fulminate voisine de 15 %, la vitesse de cette combustion est de l'ordre du dm./sec.
55 à 100	La combustion donne naissance à l'onde explosive après une période de combustion d'autant plus importante que la teneur en sable du mélange est plus élevée.

Les photographies sont analogues à celles obtenues avec les mélanges fulminate-tétryl. Nous n'avons pas jugé utile de les reproduire.



Fig. 25. — Inflammation par cordeau Bickford d'un mélange fulminate-tétryl, contenant 70 % de fulminate.



Fig. 26. — Inflammation par cordeau Bickford d'un mélange de fulminate et de tétryl contenant 85 % de fulminate.



Fig. 27. — Inflammation par cordeau Bickford d'un mélange fulminate-tétryl, contenant 90 % de fulminate.

Il est intéressant de remarquer :

1° Pour une valeur déterminée de la teneur en fulminate, le mélange avec du sable (matière inerte) est plus explosif que le mélange avec du tétyl (matière explosive). Le fulminate peut supporter une proportion de sable (45 %) bien supérieure à celle de tétyl (20 %) sans perdre ses propriétés d'explosif d'amorçage.

Les raisons de ce fait sont les suivantes :

a) La densité de chargement des mélanges fulminate-sable est supérieure à celle des mélanges fulminate-tétyl.

b) C'est le volume et non le poids de la matière diluante qu'il faut considérer.

2° Pour les faibles teneurs en fulminate, la vitesse de combustion des mélanges de fulminate et de sable est notablement plus grande (100 fois environ) que celle des mélanges de fulminate et de tétyl.

En résumé, nous avons, dans ce chapitre, étudié, par la méthode d'enregistrement photographique, l'établissement du régime détonant dans les explosifs d'amorçage.

Nous avons tout d'abord précisé les caractères de la décomposition sous l'action de la chaleur et du choc pour l'azoture de plomb et pour le fulminate de mercure. Par un choc suffisamment violent (détonateur), on obtient toujours une détonation franche. Mais par élévation de température, l'azoture de plomb détone, tandis que le fulminate de mercure brûle. Suivant qu'ils se comportent comme l'azoture de plomb ou le fulminate de mercure, nous avons alors divisé les explosifs d'amorçage en deux catégories. A côté du fulminate de mercure, nous avons rangé l'hexaméthylènetriperoxydediamine, et, dans une certaine mesure, le peroxyde de tricycloacétone. A côté de l'azoture de plomb, nous avons placé les azotures d'argent et de cuivre, ainsi que le fulminate d'argent. Incidemment, nous avons montré que le peroxyde de tricycloacétone peut, suivant la température de chauffe, se comporter soit comme le fulminate de mercure, soit comme l'azoture de plomb. La température nécessaire pour produire sa combustion est plus élevée que celle nécessaire pour produire sa détonation.

Dans les explosifs du type fulminate de mercure, l'établissement de l'onde explosive est donc précédé d'une période de combustion plus ou moins importante. Nous avons étudié ce phénomène en détail en utilisant des trainées parallépipédiques de fulminate pur enflammées avec un cordeau Bickford. Si la section de la trainée est inférieure à 30 mm², l'onde

explosive ne prend pas naissance, même en opérant avec des trainées de 1 m. de longueur. Si la section est supérieure à 30 mm², l'onde explosive se forme dans une partie de la masse déjà en combustion. C'est donc seulement au moment où l'onde explosive rejoint le front de la flamme, qu'il y a, dans la trainée, une détonation pure et simple. Une onde rétrograde prend naissance en même temps que l'onde explosive, et achève vers l'arrière la décomposition du fulminate. La distance d au bout de laquelle prend naissance l'onde explosive ne dépend pas seulement de la section de la trainée: pour une section donnée, d est d'autant plus courte que la hauteur est plus grande.

Enfin, nous avons étudié la combustion et la formation de l'onde explosive dans des mélanges à proportions variables de fulminate et de tétryl, puis de fulminate et de sable. Nous avons montré que l'adjonction d'une certaine quantité de sable au fulminate, *réduit moins les propriétés explosives de ce dernier*, que l'adjonction de la même quantité de tétryl.



CHAPITRE IV

L'AMORÇAGE

A. — Le pouvoir excitateur des explosifs d'amorçage

Pour provoquer la détonation d'un explosif secondaire, le détonateur doit produire un travail de choc suffisant. Ce travail de choc dépend d'un grand nombre de facteurs : nature de l'explosif et de son enveloppe, charge et densité de chargement, etc... Diverses recherches ont été effectuées sur ce sujet. Elles ont conduit en particulier à la notion de *charge limite*. C'est pour un explosif secondaire donné, la quantité d'explosif d'amorçage nécessaire pour amener sa détonation. Elle doit produire un travail de choc juste suffisant pour vaincre l'inertie de l'explosif secondaire. Elle dépend évidemment d'un grand nombre de conditions expérimentales.

Les valeurs comparatives des charges limites par rapport à un explosif secondaire donné, permettent un classement des explosifs d'amorçage suivant leur pouvoir excitateur. En particulier WÖHLER (1) a comparé l'action excitatrice de la plupart des fulminates et des azotures. Il est arrivé notamment au résultat suivant. Dans le cas où l'explosif excité est suffisamment sensible — tétryl, acide picrique — la charge minima d'explosif d'amorçage nécessaire pour obtenir la détonation (charge limite) est beaucoup plus grande pour le fulminate de mercure que pour l'azoture de plomb (0 gr. 29 au lieu de 0 gr. 025). Au contraire, si l'explosif excité est peu sensible — trinitroanisole ou trinitroxylol — la charge limite est sensiblement la même pour les deux explosifs d'amorçage. D'autre part, si on ajoute au fulminate de mercure une faible quantité d'azoture de plomb, la charge limite du mélange est, dans tous les cas, *nettement inférieure* à celle de l'azoture de plomb seul.

WÖHLER a donné de ces résultats l'explication suivante : la flamme du cordeau d'allumage produit d'abord une faible vitesse de décomposition du détonateur initial, qui augmente seulement par la voie d'autres réactions, jusqu'à l'action brisante et amorçante. Cette augmentation de vitesse a lieu

très vite pour les azotures et certains fulminates, mais a lieu lentement pour les fulminates de mercure et de thallium. L'adjonction d'une faible quantité d'azoture de plomb au fulminate de mercure augmente l'accélération de sa décomposition.

Les résultats des recherches exposées dans le chapitre précédent nous permettent de préciser et d'expliquer ces phénomènes. Rappelons tout d'abord brièvement nos conclusions.

1° La décomposition explosive de l'azoture de plomb sous l'action de la chaleur est une *détonation* (même en opérant sur de très petites quantités de substance).

2° La décomposition explosive du fulminate de mercure sous l'action de la chaleur est une *combustion*.

3° Si on enflamme une trainée de fulminate de mercure, le passage de la combustion (vitesse 10 à 20 m/sec.) à la détonation (vitesse 2000 à 3000 m/sec.) a lieu d'une façon *discontinue*, dans une tranche en combustion.

Même à l'air libre l'azoture de plomb prend immédiatement une vitesse de décomposition dont le moins que l'on puisse dire est qu'elle est très voisine de la vitesse normale de détonation. On doit admettre que cette vitesse est suffisante pour conférer à la décomposition un pouvoir excitateur. Dans ces conditions, il suffit d'une quantité extrêmement faible d'azoture de plomb pour amorcer un explosif secondaire de sensibilité infiniment grande. Cette quantité serait même infiniment petite si on pouvait éviter le premier effet de la chaleur, sous forme de décomposition non explosive. Cet effet est, pour tous les explosifs, d'autant moins important que la température est plus élevée; il est à peu près négligeable quand l'explosif d'amorçage est enflammé par un cordeau Bickford.

La combustion ne produit aucun travail de choc appréciable; par suite, dans le cas du fulminate de mercure, *la charge limite minima est la quantité d'explosif brûlé avant la formation de l'onde explosive*. Sa valeur est constante si on opère toujours dans des conditions identiques. Elle mesure la charge limite correspondant à un explosif secondaire de sensibilité infinie.

Considérons maintenant un explosif secondaire caractérisé par une insensibilité K . La charge limite Q est, pour tous les explosifs d'amorçage, la somme de deux termes :

1° La charge limite Q_0 , correspondant à un explosif secondaire de sensibilité infiniment grande. C'est la quantité d'explosif d'amorçage brûlée avant la formation de l'onde explosive.

2° La quantité d'explosif d'amorçage dont la détonation produit un travail de choc juste suffisant pour vaincre K , soit Q'_1 dans le cas de l'azoture de plomb et Q'_2 dans celui du fulminate de mercure.

Si l'explosif d'amorçage est $(CNO)_2Hg$ $Q = Q_0 + Q'_2$

Si l'explosif d'amorçage est N^6Pb $Q = Q'_1$

Le pouvoir excitateur *de la détonation* du fulminate de mercure étant plus grand que celui correspondant à *la détonation* de l'azoture de plomb, Q'_2 est toujours inférieur à Q'_1 (quel que soit K).

On conçoit alors fort bien que pour les faibles valeurs de K , le terme Q_0 jouant un rôle prépondérant, la charge limite soit plus grande pour le fulminate de mercure que pour l'azoture de plomb, et qu'au contraire pour les grandes valeurs de K , le terme Q'_1 puisse atteindre, et même dépasser, la somme $Q_0 + Q'_2$.

Il est facile d'expliquer l'action produite par un peu d'azoture de plomb mélangé au fulminate de mercure. Dès que la flamme arrive au contact de l'azoture de plomb, celui-ci *détone*. La détonation d'un grain d'azoture est suffisante pour amorcer immédiatement l'onde explosive dans le fulminate. Dans ce cas, la charge limite correspondant à un explosif secondaire de sensibilité infinie, sera donc la *quantité de fulminate brûlée avant la détonation du premier grain d'azoture de plomb*. Cette charge limite peut donc être extrêmement faible.

L'enregistrement photographique apporte, à cette hypothèse, une vérification expérimentale très satisfaisante. Il suffit de se reporter aux *figures* 11 à 27.

Ces résultats peuvent être généralisés aux deux catégories d'explosifs d'amorçage telles que nous les avons définies précédemment : type fulminate de mercure et type azoture de plomb.

B. — Formation de l'onde explosive dans les explosifs secondaires

Nous avons procédé à l'enregistrement photographique de la formation de l'onde explosive dans des colonnes d'acide picrique, amorcées par la détonation de quantités variables de fulminate de mercure.

L'acide picrique était introduit dans des tubes de verre. Il avait été préalablement desséché pendant plusieurs jours, sur de la potasse en morceaux, dans le vide de la pompe à huile. L'amorce était constituée par une colonne de fulminate de mercure de longueur variable l , de densité de char-

gement constante et égale à 1,25. Le fulminate était disposé dans le même tube de verre que l'acide picrique, et en contact avec l'extrémité à amorcer. Sa détonation était provoquée par la flamme d'un cordeau Bickford.

Dans ces conditions, on remarque que si le tube de verre employé a 9 mm. de diamètre intérieur, et la colonne d'acide picrique 0,92 de densité de chargement, la longueur l nécessaire pour produire la détonation de l'acide picrique est 10 mm. environ.

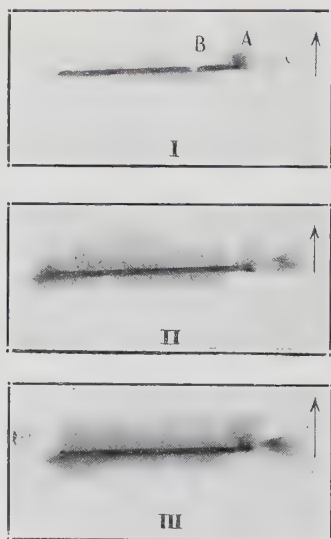


Fig. 28. — Détonation de colonnes d'acide picrique dans des tubes de verre de 9 mm. de diamètre.

Les photographies obtenues pour $l > 10$ mm. montrent que la détonation se propage à une vitesse constante et égale à 3900 m/sec. dans toute la colonne d'acide picrique. L'onde explosive prend donc sa vitesse de régime dès le début de la colonne, ou tout au moins la photographie ne permet pas de déceler de période préalable.

Pour $l < 10$ mm. au contraire, l'acide picrique est projeté sur le treteau et dans la salle sans que les photographies indiquent de combustion ou de détonation partielles appréciables.

Il faut signaler cependant que l'aspect de l'image de la détonation de l'acide picrique varie avec l . Les photographies sont d'au-

tant plus lumineuses que l est plus faible, tout au moins pour les valeurs de l inférieures à 3 cm.

Les photographies I, II, III de la *figure 28* représentent, dans ces conditions, la détonation de l'acide picrique pour $l = 10$ cm., $l = 2$ cm., $l = 1$ cm. L'extrémité amorcée est à la droite de la photographie. La fin de la colonne de fulminate est indiquée en B sur la photographie I, grâce à une bande de papier opaque collée sur le tube. La détonation du fulminate est donc représentée par A B.

Des résultats bien plus intéressants ont été obtenus en utilisant un mode différent d'amorçage. Ils seront exposés à la suite de l'étude de la détonation par influence, à la fin de ce mémoire.



CHAPITRE V

LA DÉTONATION ET LES PHÉNOMÈNES LUMINEUX

La méthode d'enregistrement chrono-photographique permet l'étude des phénomènes lumineux provoqués par la détonation. En particulier, la détonation elle-même est presque toujours assez lumineuse pour pouvoir être photographiée aisément.

A. — Vitesse de détonation du fulminate de mercure

De nombreuses mesures des vitesses de détonation des explosifs solides, ont été, depuis 1924, exécutées par la méthode d'enregistrement photographique. Toutes se rapportent aux explosifs secondaires, nous en avons, au cours de l'introduction, cité les principaux auteurs.

On trouve, dans la littérature, peu de renseignements concernant les vitesses de détonation des explosifs d'amorçage. Dans le cas particulier du fulminate de mercure, seuls, à notre connaissance, les résultats indiqués par le tableau I ont été publiés.

TABLEAU I

v désigne la vitesse de détonation.

Δ désigne la densité de chargement.

d désigne le diamètre de la colonne d'explosif.

v (m./sec.)	Δ (gr./cm ³)	d (mm.)	AUTEURS
3000	loose	»	ROBERTSON (1).
3920	»	6,45	BICHEL (2).
3250	1,25	»	KLING et FLORENTIN (3).
6500 (évaluation)	3,5	»	d'après KAST (4).
3920	»	»	d'après ESCALES et STETTBACHER (5).

Les auteurs ne précisant pas suffisamment les conditions expérimentales, ces valeurs sont difficilement utilisables. Aucune comparaison entre elles n'est possible.

Disposant de quantités notables de fulminate de mercure (variété grise titrant 99 % en fulminate pur, d'après la réaction de Brownsdon), il nous a paru intéressant de mesurer, dans des conditions expérimentales bien déterminées, la vitesse de détonation de cet explosif.

Ces mesures furent effectuées par la méthode d'enregistrement photographique. Le fulminate était introduit dans un tube de verre. Sa détonation était provoquée par un détonateur électrique n° 7 (1 gr. 5 de fulminate). La vitesse de détonation v dépend à la fois du diamètre du tube de verre d et de la densité de chargement Δ .

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau II.

TABLEAU II

d (mm)	9	9	13	13
Δ (gr./cm ³)	0,85	1,25	1	1,35
v (m./sec.)	2270	2700	2500	3000
d	13	7,5		
Δ	1,45	1,45		
v	3300	2700		

Ces valeurs ne sont connues qu'à 5 % près environ. En effet, nos mesures portaient sur des longueurs d'explosif de 50 cm., et la vitesse de translation du papier sensible était en moyenne voisine de 35 m/sec. En admettant que l'on puisse mesurer l'inclinaison de l'image photographique à 0 mm. 5 près, l'erreur peut, dans ces conditions, atteindre 5 %. Pour cette raison, il était inutile de mesurer le diamètre du tube de verre et la densité de chargement avec une très grande précision.

B. — Gaz en combustion projetés en avant par la détonation de la dernière tranche d'explosif

LAFFITTE (6) a montré « en introduisant un explosif solide dans un tube de verre de telle manière que la longueur de la colonne d'explosif ne soit qu'une fraction de celle du tube, et en procédant à l'enregistrement photographique de sa détonation, que l'image photographique est plus étendue

que si elle correspondait seulement à l'illumination de la partie du tube dans laquelle se propage la détonation. Le tube de verre est lumineux bien au delà de la dernière tranche d'explosif ».

Il a tout d'abord attribué ces phénomènes uniquement à l'onde de choc ou de compression, produite dans l'air du tube par la détonation de la dernière tranche d'explosif. En réalité, ils sont produits par des gaz en combustion projetés en avant en même temps que l'onde de choc. Ces phénomènes sont indépendants de la longueur de la colonne d'explosif. Leur vitesse de propagation (décroissante depuis l'origine) peut être, sur une partie de leur parcours, bien supérieure à la vitesse de détonation.

Nous allons décrire quelques expériences nouvelles ayant trait à ces phénomènes. Nous avons utilisé des explosifs particulièrement lumineux, acide picrique et tétryl, et des tubes de verre d'assez gros diamètre (jusqu'à 20 mm.). Dans ces conditions, nous avons pu observer des détails invisibles sur les photographies de LAFFITTE.

PROPAGATION DES PHENOMENES LUMINEUX

On remarque tout d'abord que *l'image des gaz en combustion va en s'élargissant à partir de la fin de la colonne d'explosif, puis se divise en plusieurs parties*. Ce fait est général, mais est d'autant plus facile à observer que le diamètre du tube de verre est plus grand. L'hypothèse suivante est susceptible d'en expliquer la cause.

Au moment de la détonation de la dernière tranche d'explosif, des gaz combustibles sont lancés en avant avec la même vitesse initiale. Chacun des gaz du mélange brûle suivant une réaction qui lui est propre et à laquelle correspond une vitesse de propagation déterminée. Il en résulte que la vitesse initiale s'amortit plus ou moins vite pour chacun d'eux. Chaque partie du phénomène correspondrait donc à une combustion déterminée. A l'appui de cette hypothèse signalons le fait que l'allure de l'image photographique, en particulier en ce qui concerne la séparation, est toujours la même pour un explosif donné, mais varie avec la nature de l'explosif.

Ces phénomènes sont mis nettement en évidence sur les photographies reproduites par la *figure 29*, et relatives à la détonation de colonnes d'acide picrique (densité de chargement 0,9) contenues dans des tubes de verre de différents diamètres. Des bandes de papier opaque, collées sur le tube, indiquent en B la fin de la colonne d'explosif. En outre, dans le cas du cliché

III, une seconde bande était collée à 50 cm. de la première. L'image de la détonation est en A B ; l'image des gaz en combustion en B C. C'est en C que l'on observe la séparation. Ces photographies correspondent aux conditions expérimentales suivantes :

	Longueur de la colonne d'explosif	Diamètre du tube
I	16 cm.	8 mm.
II	13 cm.	11 mm.
III	14 cm.	14 mm.

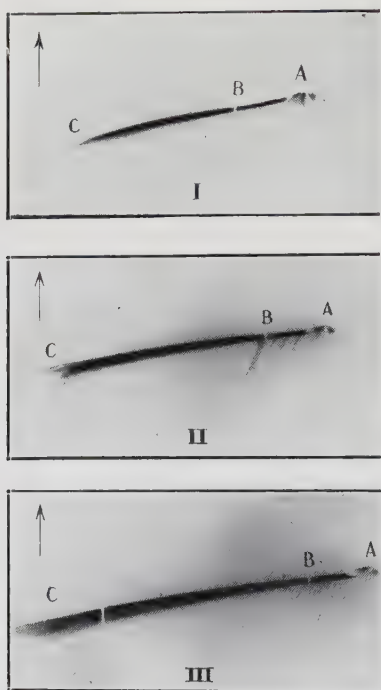


Fig. 29. — Propagation des phénomènes lumineux provoqués par la détonation d'une colonne d'acide picrique (tubes de verre de différents diamètres).

Les photographies sont d'autant plus détaillées que le diamètre du tube de verre est plus grand. Quand ce diamètre est inférieur à 8 mm., on n'observe plus la division des phénomènes lumineux. Quand il est égal à 8 mm., la division est à peine visible (2 parties seulement au lieu de 4 pour 11 mm.).

INFLUENCE D'UNE BRUSQUE VARIATION DU DIAMETRE DU TUBE SUR LA PROPAGATION DES PHENOMENES LUMINEUX

a) *Accroissement du diamètre.* — Un tube de verre de diamètre d et de longueur variable, contient, sur ses dix premiers centimètres, une colonne d'explosif Il est prolongé par un autre tube de diamètre $d' > d$. La jonction est opérée à l'aide d'un bouchon de liège.

Les photographies obtenues dans ces conditions montrent que la vitesse des gaz lumineux diminue brusquement à la sortie du premier tube. La longueur de l'image photographique, c'est-à-dire le parcours sur lequel les gaz en combustion sont suffisamment lumineux pour impressionner le papier sensible, est moins grande que quand il n'y a pas variation de diamètre. Au contraire, la largeur de l'image, correspondant à la durée de la combustion dans une tranche du second tube, est plus grande.

Les photographies I et II de la *figure 30* correspondent à cette étude dans le cas du tétryl; la photographie III, obtenue avec un tube de diamètre constant, sert de témoin. Les conditions expérimentales étaient les suivantes :

	Longueur du 1 ^{er} tube	Diamètre du 1 ^{er} tube	Diamètre du 2 ^e tube
I	27 cm.	9 mm.	16 mm.
II	24 cm.	10 mm.	15 mm.
III	80 cm.	9 mm. 5	

Dans les trois cas, la colonne de tétryl (densité de chargement 0,8) avait 10 cm. de longueur. L'image de la détonation est en A B. En B, on voit l'intervalle opaque indiquant la fin de la colonne d'explosif. En C, l'intervalle opaque correspond au bouchon de liège et indique par conséquent la jonction des deux tubes.

b) *Diminution du diamètre.* — Le dispositif expérimental est analogue au précédent, mais l'explosif est contenu dans le tube de plus grand diamètre ($d' < d$).

A la jonction des deux tubes, une partie des gaz lumineux ne rencontrant aucun obstacle entre dans le second tube, sans variation de vitesse. L'image de cette première fraction des gaz est représentée sur les photographies par un trait fin. L'autre partie des gaz rencontre le bouchon de liège. Ils

sont arrêtés un temps très court, puis passent dans le second tube. Leur vitesse décroît assez rapidement. On remarque alors un étalement considérable de l'image photographique.

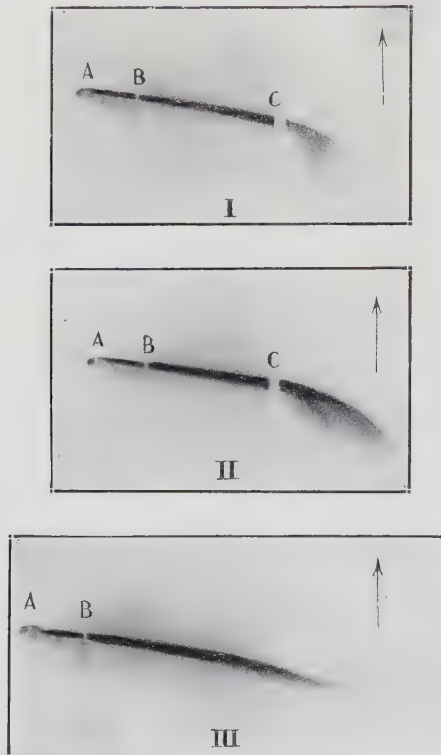


Fig. 30. — Propagation des gaz lumineux dans un tube subissant un accroissement brusque de diamètre.

Les figures 31 et 32 correspondent à cette étude.

La figure 31 représente la détonation d'une colonne de tétryl de 8 cm. de longueur, dans un tube de 17 mm. de diamètre et de 20 cm de longueur. Le second tube avait 7 mm. de diamètre. En A B, on voit l'image de la détonation. En C, l'intervalle opaque, dû au bouchon de liège, indique la jonction des deux tubes.

La figure 32 représente la détonation d'une colonne d'acide picrique. Les conditions expérimentales étaient les mêmes que dans le cas de la figure 31. B indique cette fois la jonction des deux tubes.

On peut considérer les photographies des *figures 29, 30, 31, 32*, comme constituant une bonne vérification expérimentale de la nature (combustion gazeuse), des phénomènes lumineux provoqués par la détonation.

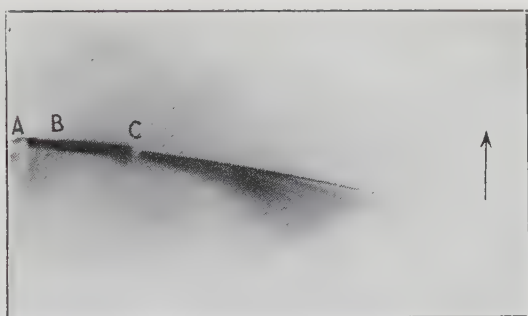


Fig. 31. — Propagation des gaz lumineux dans un tube subissant une diminution brusque de diamètre.

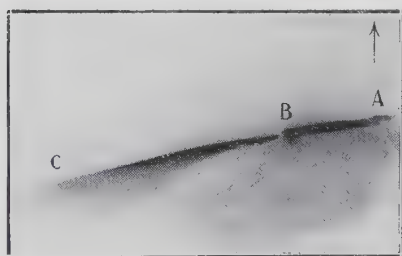


Fig. 32. — Propagation des gaz lumineux dans un tube subissant une diminution brusque de diamètre.

C. — Gaz en combustion projetés en arrière par la détonation de la première tranche d'explosif

En photographiant, non plus la région au delà de la dernière tranche d'explosif, mais la région située en deçà de la première, nous avons observé des phénomènes tout à fait comparables à ceux que nous venons d'étudier.

La détonation de la première tranche d'explosif projette en arrière des

gaz en combustion. Ces gaz sont bien moins lumineux que ceux produits par la détonation de la dernière tranche. Leur vitesse de propagation (dans la direction inverse de l'onde explosive) est considérablement moins élevée.

La *figure 33* correspond à ce phénomène. Une colonne de tétryl (densité de chargement 0,9), disposée dans un tube de verre de 16 mm. de diamètre,

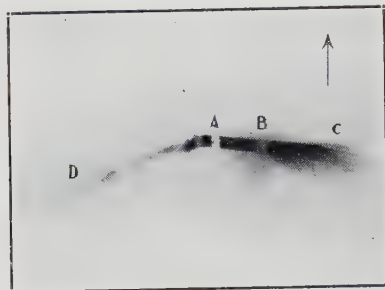


Fig. 33. — Gaz lumineux projetés en avant et en arrière par la détonation d'une colonne de tétryl.

a détoné en A B, à la vitesse de 5500 m/sec. En B C, on voit l'image des gaz lumineux projetés en avant à la suite de la détonation de la dernière tranche d'explosif. Leur vitesse initiale est voisine de 6000 m/sec. La fin du tube étant en B, ces gaz se propagent à l'extérieur du tube, ce qui explique le faible développement de l'image photographique. En A D on voit l'image des gaz lumineux produits par la détonation de la première tranche de tétryl. Leur vitesse de propagation, à l'intérieur du tube est, au début, voisine de 1500 m/sec. seulement.



CHAPITRE VI

L'ONDE DE CHOC

A. — Méthodes d'étude

En détonant, la dernière tranche d'explosif transmet à la tranche d'air au contact de laquelle elle se trouve, une pression très élevée; à son tour cette tranche d'air comprime la suivante, et ainsi de suite. La pression en un point de chaque tranche gazeuse passant d'une façon discontinue de la pression atmosphérique à une autre plus élevée, l'ébranlement ainsi provoqué dans l'air, par la détonation d'une masse d'explosif, a les caractères d'une *onde de choc*.

Les ondes de choc se propagent en s'altérant. Celle-ci étant produite par une impulsion brève, cette altération est une atténuation progressive, d'ailleurs plus rapide dans le cas des ondes sphériques que dans celui des ondes planes.

Un grand nombre de travaux mathématiques ont été exécutés sur les ondes de choc. Nous en avons cité un certain nombre dans l'introduction. Rappelons seulement que des exposés assez complets, publiés en langue française par CRUSSARD (1) et par JOUGUET (2) traitent l'ensemble de la question.

Les recherches expérimentales ont été bien moins nombreuses que les recherches théoriques. Les premières en date sont celles de REGNAULT (1864). Il montra que la vitesse des ondes de pression tend à augmenter avec l'intensité de l'ébranlement initial.

En 1899, VIEILLE (3) entreprit une étude systématique des ondes de choc et de leur propagation. Il utilisait des tubes dans lesquels il produisait en un point, une perturbation brusque du milieu gazeux. Il enregistrait, en divers points du milieu, les pressions créées par la propagation de l'onde.

L'onde de choc étant produite dans un tube rectiligne, par la détonation

d'une amorce de fulminate de mercure de 0 gr. 63, les vitesses de propagation de l'onde, mesurées par VIEILLE, sont données par le tableau I.

TABLEAU I

1073 m./sec. en moyenne	sur 0,326 m.
1049 m./sec. —	— 0,552 m.
1006 m./sec. —	— 1.131 m.
900 m./sec. —	— 2,359 m.
737 m./ —	— 3,864 m.

DAUTRICHE (4), en 1907, appliqua la méthode qu'il avait imaginée pour la mesure des vitesses de détonation, à la mesure de la vitesse des « ébranlements communiqués à l'air » par la détonation de cartouches d'explosif.

Des mesures tout à fait analogues à celles de DAUTRICHE ont été exécutées un peu plus tard par COMEY en Amérique (5). Les résultats qu'il a obtenus concordent tout à fait avec ceux de DAUTRICHE.

Enfin, en 1926, BURLOT (6) publia une « étude sur les ondes de choc aériennes au voisinage du centre d'ébranlement ». Dans ses recherches, il utilisait la détonation de quantités considérables d'explosif (parfois de l'ordre de plusieurs tonnes). Les résultats obtenus concernent la vitesse de propagation, la grandeur des pressions, la forme de l'onde. L'accord entre la théorie et les résultats expérimentaux n'est d'ailleurs pas toujours très satisfaisant.

Les méthodes utilisées par les expérimentateurs précédents ont permis de mesurer, avec précision, plusieurs caractéristiques importantes de l'onde de choc créée par la détonation des explosifs solides. Elles se trouvent en défaut sur les points suivants :

1° Elles ne permettent pas toujours l'analyse du phénomène. Dans les expériences de VIEILLE par exemple, on enregistre le passage en certains points et on mesure les effets d'une perturbation qui peut n'être pas toujours seulement l'onde de choc. En effet, dans le voisinage de l'explosif, les phénomènes lumineux — gaz en combustion — signalés par LAFFITTE se propagent, en l'absence d'écran, avec une vitesse considérable ; quel est leur rôle ? Une étude séparée de l'onde de choc et des gaz lumineux, et en particulier, la connaissance des positions respectives, à un instant quelconque, de l'onde de choc et des phénomènes lumineux (et même des projections solides et des gaz brûlés) est nécessaire pour déterminer complètement les effets extérieurs de la détonation des explosifs solides.

2° Elles ne permettent pas d'étudier la propagation de l'onde de choc d'une façon continue, depuis son origine, au contact même de l'explosif.

La méthode d'enregistrement chrono-photographique paraît au contraire tout à fait désignée pour l'étude analytique des phénomènes provoqués par la détonation. Sous la forme que lui ont donnée MALLARD et LE CHATELIER, DIXON... etc., il est évidemment impossible de photographier des phénomènes non lumineux comme les ondes de choc. Pour réaliser un tel enregistrement, on peut — comme l'a signalé pour la première fois FOUCAULT (7) — imaginer différents procédés basés sur le fait que les rayons lumineux sont déviés lorsqu'ils passent d'un milieu dans un autre de densité différente. Deux méthodes classiques sont basées sur ce principe pour la photographie de phénomènes non lumineux.

La première, imaginée par TÖPLER (8) en 1864, est la Schlieren-méthode ».

La seconde due à DVORAK (9) (1880) est la « méthode d'ombre ».

Nous allons décrire rapidement le principe de ces deux méthodes.

Celle de DVORAK est la plus simple, mais elle est plus limitée dans ses applications.

Considérons un faisceau divergent issu d'une source ponctuelle et arrivant sur un écran destiné à l'observation des ombres. Dans ce faisceau, plaçons une bulle de savon. On aperçoit sur l'écran une bande d'ombre circulaire et étroite, avec une bande intérieure contiguë brillante, sur le fond uniformément éclairé. L'anneau sombre correspond au bord de l'ombre géométrique circulaire que l'on observerait si la bulle de savon était opaque. La lumière qui n'arrive plus dans cette région contribue à former l'anneau lumineux.

Pour expliquer ce phénomène, considérons les rayons lumineux qui frappent la bulle de savon. Ceux qui arrivent sous une incidence presque rasante subissent un changement appréciable de direction (réflexion totale). Les points de l'écran où ils arrivaient avant l'introduction de la bulle de savon dans le faisceau forment l'anneau opaque. Tous les autres rayons traversent la bulle de savon et ne subissent aucun changement de direction.

Si, au lieu d'une bulle de savon, on prenait une coquille sphérique transparente d'indice n , on obtiendrait des phénomènes analogues. Les rayons déviés par l'introduction de la coquille formeraient l'anneau lumineux à l'intérieur ou à l'extérieur de l'anneau opaque, suivant que n serait plus grand ou plus petit que l'indice de l'air.

On peut considérer chacun des anneaux comme constituant une silhouette bien délimitée de la coquille.

Dans la « Schlieren méthode », la lumière venant d'une source très intense tombe sur un miroir concave. Le miroir donne par réflexion une image de la source que l'on reçoit sur une lentille. La surface de cette lentille est à moitié recouverte par un écran opaque demi-circulaire. L'écran est disposé de telle façon que l'image de la source, se faisant partie sur l'écran, partie sur la lentille, il passe suffisamment de lumière pour éclairer faiblement l'écran d'observation placé derrière la lentille.

Supposons maintenant que la bulle de savon soit placée dans le faisceau lumineux, entre le miroir et la lentille. On a réalisé la mise au point de la bulle de savon sur l'écran d'observation. Seuls les rayons qui frappent presque tangentiellement la bulle de savon sont déviés. Ils se dirigent vers l'intérieur et viennent former une image de la source devant la lentille. Ils divergent à nouveau quand ils atteignent la lentille. Certains d'entre eux, qui tombaient initialement sur la lentille, tombent maintenant sur l'écran, et d'autres, qui tombaient sur l'écran, traversent maintenant la lentille. Ceux qui sont reçus par la lentille forment une image brillante, semi-circulaire, sur l'écran d'observation. Ceux déviés sur l'écran forment une ligne sombre. L'ensemble constitue un anneau complet sur l'écran d'observation. Cet anneau est une image des bords de la perturbation.

En remplaçant la bulle de savon par une coquille sphérique d'indice n , on obtient une image analogue. Si n est plus petit que 1, les bandes opaques et lumineuses sont interverties.

Si on substitue à la coquille une sphère pleine de matière transparente, on obtiendra des résultats pratiquement analogues, car seuls les rayons frappant la sphère sous une incidence presque rasante subissent une déviation appréciable.

On peut encore généraliser davantage. La seule condition nécessaire à la production des images « Schlieren » est qu'il y ait une brusque variation de l'indice de réfraction à la surface qui limite la perturbation.

En substituant à l'écran d'observation une plaque photographique, on peut enregistrer ces phénomènes. Si la plaque photographique est fixe, on prend des instantanés, mais on peut obtenir des enregistrements continus en combinant le dispositif de MALLARD et LE CHATELIER, avec l'une ou l'autre des méthodes précédentes.

Les photographies instantanées exigent une durée de pose suffisamment courte, pour qu'il ne se produise pas un déplacement appréciable du phénomène. On utilise en général une étincelle électrique. Pour les enregistrements continus, il faut, au contraire, disposer d'une source de lumière continue.

La méthode de DVORAK a été employée dans diverses circonstances, en particulier par BOYS (10), puis par QUAYLE (11), pour photographier le déplacement des balles de fusil dans l'air et les perturbations qu'elles produisent. FOLEY et SOUDER (12) ont enregistré photographiquement des zones de compression environnant la décharge électrique. WARTENBERG et KANNEBERG (13) ont photographié des jets gazeux. Récemment, WHITE (14) a photographié la propagation des flammes dans les mélanges gazeux.

TÖPLER (15) appliqua sa méthode à l'étude des compressions produites dans l'air par l'étincelle électrique. C'est par cette même méthode que MACH et ses collaborateurs (16) ont poursuivi des recherches analogues à celles de TÖPLER, et ont de plus étudié les compressions produites dans l'air par les projectiles. La « Schlieren-méthode » a été encore utilisée par WOOD (17) pour l'étude des ondes sonores, par CRANZ et BAMES (18), ainsi que ALLEN (19) pour l'étude des mouvements produits dans l'air par des flammes.

Récemment PAYMANN et ses collaborateurs ROBINSON et SHEPHERD (20) ont employé la méthode « Schlieren » pour photographier, d'abord sur plaque immobile, l'onde de compression produite par la détonation de détonateurs au fulminate de mercure. Ils ont ensuite enregistré cette onde sur film mobile, et ont aussi étudié la détonation des mélanges gazeux.

Enfin, ces derniers temps, GAWTHROP, SHEPHERD et PERROT ont reproduit en Amérique le dispositif de PAYMANN, dans le but d'étudier les phénomènes provoqués par la détonation (21). Leurs premières publications sur ce sujet sont postérieures aux nôtres (22).

Nous n'avons pas pensé pouvoir utiliser, pour nos recherches, la « Schlieren-méthode ». Nous utilisons en effet, des masses d'explosif assez considérables (jusqu'à 50 gr.). Le réglage très délicat que nécessite cette méthode est incompatible avec notre installation; il exigerait un laboratoire spécial, analogue à celui de PAYMANN (*loc. cit.*). D'autre part, la violence des phénomènes explosifs rend superflue l'extrême précision de la méthode de TÖPLER. Nous avons en utilisant un principe analogue à celui dont se sont inspirés DVORAK et TÖPLER, imaginé une méthode différente, mais bien moins délicate. Elle est basée sur les considérations suivantes :

Soit un faisceau de rayons lumineux convergeant sur l'objectif O d'un appareil photographique (*fig. 34*). Pour simplifier, nous supposons l'objectif très petit. Limité par deux fentes horizontales et étroites, on peut considérer le faisceau comme entièrement dans le plan horizontal défini par les deux fentes. Mettons l'appareil au point sur une région AB du faisceau. Sur le verre dépoli, on observe une image rectiligne et horizontale $A'B'$ de

L'une de ces deux conditions suffit d'ailleurs pour que les résultats soient convenablement approchés (*fig.* 34). On obtiendra, après développement, une ligne blanche coupant la bande noire. On pourra mesurer la vitesse de propagation de l'onde, si on connaît la vitesse de déplacement du papier sensible.

Pratiquement, l'objectif n'est pas très petit, et les fentes ont une largeur appréciable. On fait en sorte que le faisceau lumineux couvre juste l'objectif. Dans ce cas, le raisonnement précédent doit être modifié légèrement.

Considérons les rayons lumineux passant par un point C pris sur A B. Quand l'air est au repos, ces rayons sont contenus dans un cône ayant pour sommet C et pour base l'objectif. Au passage de l'onde, ces rayons sont déviés, une certaine fraction n'arrive plus dans l'objectif. La ligne représentant l'onde de pression sur les photographies sera, non pas toujours blanche, mais d'une teinte variant du noir au blanc, suivant l'importance de la lumière résiduelle. En général, la différence de teinte entre cette ligne et la bande noire uniforme est suffisante pour rendre facile l'interprétation des photographies.

Deux auteurs, BURLLOT (6) et VAUTIER (23) ont donné quelques renseignements sur la structure de l'onde de choc produite par la détonation. Ils ont montré en particulier que le sommet de l'onde ne coïncide pas avec le front, mais en est très voisin, et que le milieu ne revient à son état initial que très lentement. La propagation de cette onde sera représentée sur les photographies, non par une ligne claire, mais par une surface claire que nous appellerons « *zone de compressions* ». Nous conviendrons d'appeler *onde de choc* le sommet de cette onde. Comme on peut confondre le sommet et le front de l'onde, le front de la zone des compressions correspond à l'onde de choc.

L'expérience nous a montré que l'on pouvait, par cette méthode obtenir de bonnes photographies pour des ondes créant des variations d'indice de réfraction certainement peu considérables. D'autre part, on peut utiliser des faisceaux lumineux beaucoup moins convergents, c'est-à-dire dont la section par le plan vertical contenant l'objectif est bien plus grande que ce dernier, sans diminuer notablement la sensibilité de la méthode. Nous avons attribué ces résultats aux deux causes suivantes :

1° La déviation des rayons lumineux dépend de l'incidence, c'est-à-dire de la forme de la surface d'onde. Dans les conditions expérimentales où nous nous sommes placés, il est probable que la forme de la surface d'onde était tout à fait propice aux fortes déviations, dues en particulier à la réflexion totale.

2° L'onde crée sur son passage un milieu optique différent de l'air environnant. Dans ces deux milieux, l'absorption et la diffusion de la lumière ne sont pas identiques. De plus, à la surface de séparation des différents milieux, une certaine fraction de la lumière se réfléchit. Tout cela se traduit par une variation de la quantité de lumière émergente en sens inverse de la pression. Ces effets s'ajoutent donc à ceux provenant des variations d'indice de réfraction.

Le passage des gaz opaques et des particules solides dans la région A B, sera signalé sur les photographies en raison même de leur opacité.

B. — Dispositif expérimental

Les figures 35 et 36 représentent schématiquement l'ensemble de l'installation.

Après une longue période d'essais, pendant laquelle nous avons utilisé tour à tour les sources lumineuses suivantes : lampe pointolite Phillipps

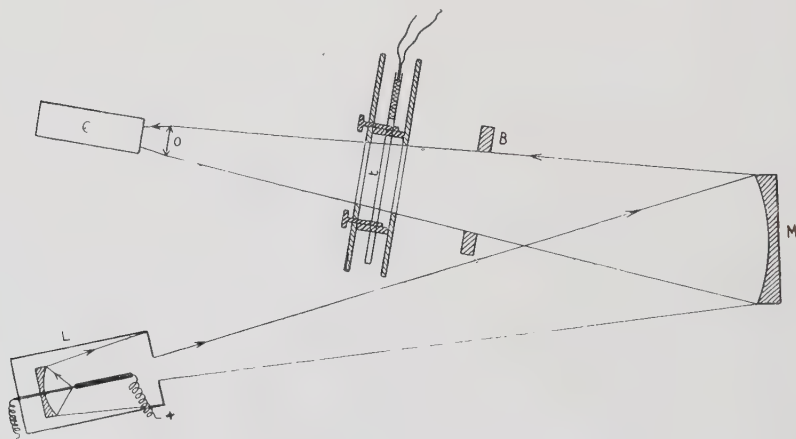


Fig. 35. — Schéma de l'installation (projection horizontale).

lampe à ruban de tungstène Phillipps, lampe à filament de tungstène Phillipps pour la projection cinématographique, nous avons définitivement adopté une lampe à arc.

La lampe *L* est d'un type utilisé pour la projection cinématographique (Gaumont). Elle fonctionne sous une tension de 70 volts, avec une intensité de 35 ampères environ. Les deux charbons sont horizontaux, et dans le prolongement l'un de l'autre. Le charbon négatif traverse un miroir concave de 20 cm. de diamètre, en verre argenté, servant de condenseur.

Devant la lampe à arc, on peut placer un écran, percé d'un trou circulaire, permettant d'utiliser une portion convenable du faisceau lumineux. C'est ce trou qui constitue en quelque sorte la source lumineuse. Le faisceau est dirigé sur un miroir sphérique concave M , en verre argenté, de 4 m. de rayon de courbure et de 36 cm. de diamètre. On règle la position de l'arc de façon à obtenir un faisceau couvrant à peu près exactement le miroir M .

La distance de l'écran au miroir M est de 4 mètres environ. La source lumineuse et l'objectif sont disposés symétriquement par rapport à l'axe optique et au centre du miroir. Aussi le diamètre du trou percé dans l'écran étant égal au diamètre de l'objectif, ce dernier est recouvert exactement par l'image de la source.

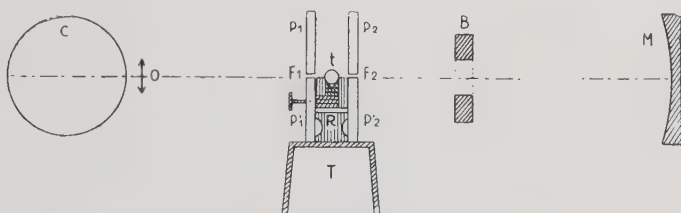


Fig. 36. — Schéma de l'installation (projection verticale).

Le film sensible est enroulé sur un cylindre en carton C . La description de l'appareil photographique et celle de la méthode utilisée pour la mesure de la vitesse de rotation du cylindre C ont déjà été données au chapitre III.

Entre le miroir et l'objectif sont placés :

1° Un bouclier B , vertical, percé d'une ouverture rectangulaire limitant le faisceau lumineux issu du miroir. Ce bouclier protège divers appareils des éclats produits par la détonation.

2° Une sorte de tréteau en acier, constitué par un rail de chemin de fer fixé sur un support très lourd et très stable. Un appareillage fixé au rail permet au faisceau lumineux de passer entre deux fentes horizontales de 1 mm. de largeur et distantes de 10 cm. (fig. 36). Chaque fente est constituée par l'intervalle compris entre deux plaques en acier P_1-P_1' , P_2-P_2' . Ces plaques sont fixées verticalement au rail par l'intermédiaire de montants. Elles ont 1 cm. d'épaisseur, 1 mètre de longueur et 5 cm. de largeur. Elles se trouvent interrompues sur des longueurs de 3 cm. par les montants placés de 30 cm. en 30 cm.

On produit les phénomènes à étudier entre les deux fentes. Le plus souvent, l'explosif étant contenu dans un tube de verre t , il faut pouvoir

disposer celui-ci convenablement. Dans ce but, chaque montant comporte à l'intérieur du tréteau une glissière verticale. Des supports, mobiles dans ces glissières au moyen d'un système à crémaillère, permettent de placer le tube horizontalement et à une hauteur telle que le faisceau lumineux, limité par la première fente, traverse la région à étudier, puis sorte par la seconde fente et enfin arrive dans l'objectif photographique.

Le sommet du miroir, les deux fentes, le centre de l'objectif, sont évidemment dans un même plan horizontal.

Les deux systèmes de plaques P_1 et P_2 servent non seulement (par leurs fentes) à délimiter le faisceau lumineux, mais aussi à protéger les appareils des éclats projetés par l'explosion. En outre, une glace protège directement le miroir M.

La distance du tréteau au miroir est d'environ 2 mètres. Par suite, la largeur du faisceau est, au voisinage des fentes, de 15 à 20 cm.

Il est évident que l'obturateur doit rester ouvert pendant un temps d'une durée inférieure à celui mis par le cylindre pour effectuer une révolution (de l'ordre de $1/40$ à $1/50$ de seconde dans nos expériences). De plus, c'est pendant ce court intervalle de temps que doit se produire l'explosion. A cet effet, deux relais électro-magnétiques sont placés en dérivation dans le circuit d'une batterie de trois accumulateurs. L'un déclanche l'ouverture de l'obturateur (qui reste ouvert pendant $1/60$ de seconde par exemple), l'autre ferme un second circuit, comprenant une amorce électrique dont l'explosion provoque la détonation de la capsule de fulminate de mercure. C'est en réglant convenablement, d'une part la tension du fil déclanchant l'ouverture de l'obturateur, et d'autre part la distance des armatures mobiles aux butoirs des relais électro-magnétiques, que l'on peut régler le synchronisme entre l'ouverture de l'obturateur et la détonation de l'explosif.



CHAPITRE VII

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES ONDES DE CHOC

Au début de nos recherches, nous avons uniquement l'intention d'étudier les phénomènes provoqués dans l'air par la détonation des explosifs solides. Les ondes de choc planes s'amortissant moins rapidement que les ondes de choc sphériques, nous avons songé à opérer dans des tubes de verre.

Nous nous sommes rapidement rendu compte que nous ne pouvions adopter un tel dispositif. En effet, les parois du tube de verre sont rendues en grande partie opaques avant le passage de l'onde de choc, par un phénomène que nous allons étudier dans la première partie de ce chapitre.

A. — Onde se propageant dans les parois du tube de verre

Au cours de recherches faites par la méthode ordinaire d'enregistrement photographique, JONES (1) a signalé que les photographies obtenues sont beaucoup moins nettes lorsque l'explosif est contenu dans un tube de verre que lorsqu'il est à nu. Il a supposé que ce phénomène était dû à une onde se propageant dans le verre à la vitesse du son.

La méthode et le dispositif optique décrits au cours du chapitre précédent nous ont permis de vérifier l'hypothèse de JONES et d'étudier en détail la propagation et les effets de cette onde.

L'explosif est introduit dans un tube de verre (*fig. 37*), dont il n'occupe qu'une fraction de la longueur. Le détonateur D (N° 7; 1 gr. 5 de fulminate) est maintenu dans l'axe du tube, au contact de l'explosif E, à l'aide d'un bouchon de liège B. Dans certaines expériences, nous avons

étudié les phénomènes produits par la seule explosion du détonateur sans ajouter l'explosif E.

Le tube est disposé de manière à ce que le faisceau lumineux délimité par les fentes du tréteau et l'écran B (*fig. 35*) traverse la région du tube située au-delà de l'explosif, à une distance variable suivant les expériences.

Les photographies obtenues dans ces conditions montrent que l'intensité de la lumière provenant de la source et arrivant sur la pellicule sensible après avoir traversé les parois du tube de verre, est considérablement diminuée avant le passage des phénomènes lumineux provoqués par la détonation. Cet arrêt de la lumière correspond à un phénomène se propageant très rapidement dans les parois du tube de verre.

Sur les meilleures photographies, on observe une ligne droite fine, très nette, blanche sur les négatifs, correspondant au passage de ce phénomène.

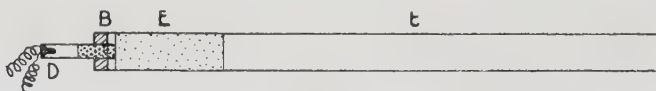


Fig. 37.

La largeur de cette image nous permet d'attribuer au passage de l'onde en un point, une durée de l'ordre de $1/100.000$ de seconde.

Cette onde modifie profondément le verre. Comme celui-ci n'est pas parfaitement homogène, l'effet qu'elle produit varie d'un point à l'autre des parois du tube. En général, le verre est rendu aussitôt suffisamment opaque pour que les rayons lumineux n'arrivent plus dans l'objectif. En certains endroits cependant, le verre ne perd pas sa transparence dès le passage de l'onde. Sa transformation demande un certain temps, qui peut être d'ailleurs fort appréciable (de l'ordre de $1/1.000$ de seconde). Enfin, certaines régions privilégiées des parois du tube gardent leur transparence après le passage du phénomène.

L'aspect des photographies dépend bien moins de l'explosif employé que du verre. C'est avec des tubes en verre vert, dont l'épaisseur des parois était voisine de 3 mm., que nous avons obtenu les résultats les plus nets. En effet, dans ce cas, le passage de l'onde est toujours signalé par une ligne blanche rectiligne. Nous avons pu recueillir des morceaux assez gros du tube après l'explosion. Chacun semble formé d'un assemblage d'éclats plus petits qui n'ont cependant pas été séparés les uns des autres. Dans certains cas, nous avons trouvé quelques éclats encore transparents. Cela explique que sur les photographies, la traînée noire ne soit pas toujours

interrompue régulièrement et que l'on ait quelquefois des plages encore éclairées à côté d'autres entièrement sombres.

Avec du cristal de 0,5 mm. d'épaisseur, on obtient des photographies sur lesquelles la ligne blanche, correspondant au passage de l'onde, est en général peu visible.

Nous nous sommes demandé si la forme cylindrique du tube n'introduisait pas des perturbations optiques parasites. Nous avons exécuté des expériences semblables aux précédentes en utilisant des tubes parallépipédiques, obtenus en collant convenablement quatre plaques de verre. Les résultats furent absolument identiques à ceux obtenus dans des tubes cylindriques.

Dans toutes les expériences précédentes, le détonateur était en contact, soit directement, soit par l'intermédiaire du bouchon de liège, avec les parois du tube de verre. En supprimant ce contact, on obtient encore des photographies analogues.



Fig. 38.

Pour nous assurer que toutes les observations précédentes correspondent bien à une onde se propageant dans les parois du tube de verre, nous avons fait les expériences suivantes :

1° En employant, au lieu d'un tube de verre, un tube en nitrate de cellulose ou en cellophane d'épaisseur suffisamment faible (de l'ordre de 0,1 ou 0,01 mm.), on n'obtient rien de semblable.

2° De même on n'observe pas ces phénomènes si on remplace le tube de verre par un tube métallique muni de fentes horizontales.

3° En remplissant le tube de verre avec du sable, sur une longueur de 30 cm. environ, nous avons obtenu des photographies montrant la propagation du phénomène étudié au-delà du sable. Il ne peut donc s'agir d'une onde se propageant dans l'atmosphère du tube.

4° En provoquant l'explosion d'un détonateur au contact d'une lame de verre à faces parallèles, on obtient encore des photographies semblables.

Nous avons employé des lames à faces parallèles de 6 mm. d'épaisseur, 40 cm. de longueur et 3 cm. de largeur. Le détonateur D était placé comme l'indique le *figure* 38. Le faisceau lumineux traversait normalement la lame (perpendiculairement au plan de la figure).

On retrouve, après l'explosion, de très gros morceaux de verre que nous avons examinés. Ils semblent formés d'un assemblage de grains très fins, mais la surface de chacun de ces morceaux ainsi constitués est restée intacte et lisse. Ils se brisent très facilement dans le sens de la propagation de l'onde et d'ailleurs on peut observer un certain nombre de fentes dans cette direction privilégiée. L'examen au microscope n'a pas donné de résultats concluants.

La vitesse de propagation de l'onde dans le verre semble être à peu près indépendante de l'explosif employé. Il faut cependant remarquer que l'amorce de fulminate détonant avant l'explosif E, c'est très probablement le phénomène dû au fulminate que l'on observe. La vitesse de propagation dépend nettement de la nature du verre, mais non du diamètre du tube. Cette vitesse est constante dans le cas de tubes dont la longueur est de l'ordre du mètre.

Dans les tubes en cristal dont l'épaisseur des parois est de 0 mm. 5, la moyenne des résultats obtenus pour la vitesse de propagation de cette onde est :

$$5.800 \text{ m/sec.}$$

Dans les tubes en verre vert dont l'épaisseur des parois est de 3 mm., elle est :

$$6.700 \text{ m/sec.}$$

Ces valeurs sont voisines de la vitesse du son dans le verre.

Description des photographies. — Les photographies reproduites par les figures 39, 40, 41, ont été obtenues en faisant détoner une capsule de fulminate de mercure (1 gr. 5.) dans des tubes de verre mince (0,5 mm., fig. 39, 40) ou de verre épais (3 mm., fig. 41).

Dans l'expérience correspondant à la figure 39, la région éclairée commençait à 7 cm. du détonateur. C'est le pinceau lumineux issu de la lampe à arc qui a impressionné le film en X A X A ; ce dernier se déplaçait dans le sens de la flèche F. La lumière a été en grande partie arrêtée en A A par les parois du tube, lorsqu'elles ont été rendues opaques par le phénomène étudié. L'inclinaison de A A en donne la vitesse de propagation ; B B correspond aux phénomènes lumineux provoqués par la détonation.

La figure 40 (agrandissement 1,5) est semblable à la précédente, mais la région éclairée commençait à 15 cm. du détonateur. A A correspond aux phénomènes lumineux, B C au passage de l'onde dans les parois du tube.

Pour obtenir la figure 41 (agrandissement 1,5), on a utilisé un tube en verre vert dont les parois avaient 3 mm. d'épaisseur. La partie éclairée commençait à 32 cm. du détonateur. On voit que le phénomène est extrê-

mement-net. Dans ce cas, où les parois du tube étaient relativement épaisses, on voit très bien la ligne blanche correspondant au passage de l'onde, et dont il a été question plus haut. En D E, la lumière a été complètement

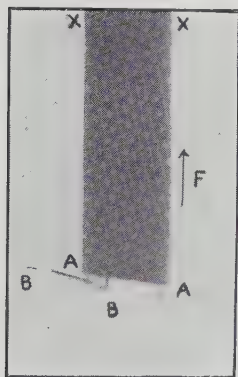


Fig. 39. — Explosion d'un détonateur dans un tube en verre mince, la région éclairée commençant à 7 cm. du détonateur.

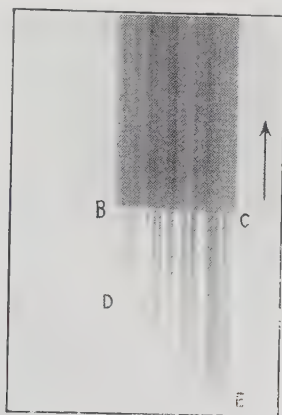


Fig. 41. — Explosion d'un détonateur dans un tube en verre épais, la région éclairée commençant à 32 centimètres du détonateur.

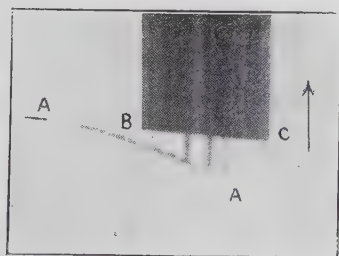


Fig. 40. — Explosion d'un détonateur dans un tube en verre mince, la région éclairée commençant à 15 centimètres du détonateur.

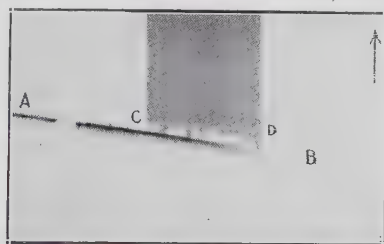


Fig. 42. — Explosion d'une colonne de dynamite dans un tube en verre épais, la région éclairée commençant à 25 cm. de l'extrémité de la colonne d'explosif.

arrêtée par des gaz opaques se propageant dans l'atmosphère du tube. On était dans ce cas trop loin du détonateur pour pouvoir enregistrer les phénomènes lumineux comme dans les deux photographies précédentes.

La figure 42 (agrandissement 1,5), correspond à la détonation d'une colonne de dynamite de 10 cm. de longueur, dans un tube de verre vert de

12 mm. de diamètre dont les parois avaient 3 mm. d'épaisseur. La région éclairée commençait à 25 cm. de la fin de la colonne d'explosif, c'est-à-dire à 35 cm. du détonateur. On voit très bien la ligne blanche C D correspondant au passage de l'onde de choc, et les phénomènes lumineux A B. On remarquera sur cette photographie que, sauf en de rares endroits, les parois du tube n'ont été rendues opaques qu'un temps fort appréciable après le passage de l'onde de choc.

Les coupures dans l'image des phénomènes lumineux, que l'on observe sur un grand nombre de photographies, correspondent aux interruptions des fentes, causées par les montants du tréteau.

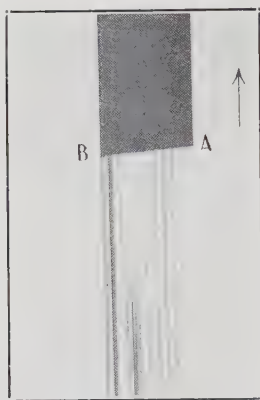


Fig. 43. — Explosion d'un détonateur
au contact d'une lame de verre à faces parallèles.
La région éclairée commençant à 20 cm. du détonateur.

La *figure* 43 est relative à l'explosion d'un détonateur disposé de la façon indiquée plus haut, au contact d'une lame de verre à faces parallèles de 40 cm. de longueur, 2 cm. de largeur et 5 mm. 5 d'épaisseur. La glace a été rendue presque complètement opaque dès le passage de l'onde (A B). Contrairement aux photographies précédentes, le sens de propagation est de droite à gauche de la photographie.

PROJECTION EN AVANT DE L'EXTREMITE DU TUBE DE VERRE

En éclairant la fin du tube et la région située au delà, nous avons pu étudier ce qui se produit lorsque l'onde dans le verre parvient à l'extrémité du tube. Les photographies obtenues dans ces conditions montrent que la

lumière est en grande partie arrêtée par la propagation dans l'air d'une perturbation dont la vitesse est faible (inférieure à 100 m/sec) et constante (sur 10 à 15 cm. tout au moins). Cette perturbation prend naissance au moment où l'onde dans le verre arrive à l'extrémité du tube.

Nous avons fait un grand nombre d'expériences pour déterminer la cause et la nature de ce phénomène. Les premiers résultats furent les suivants :

Si on remplace le tube de verre par un tube en porcelaine vernissée, ou bien par une lame à faces parallèles, les photographies obtenues montrent la propagation d'une perturbation analogue.

On obtient encore un résultat identique en recouvrant le tube de verre avec du papier opaque.

Au contraire, en remplaçant le tube de verre par un tube métallique quelconque (tubes de laiton, d'acier, de cuivre, de diamètre et d'épaisseur variables), la perturbation ne se produit plus.

Il résulte de ces premières expériences que le phénomène observé est lié à la matière constituant le milieu de propagation de l'onde de choc, c'est-à-dire, dans ce cas particulier, au verre. En examinant de près les photographies, on peut faire les observations suivantes. En général, les filets blancs — correspondant, après le passage de l'onde de choc aux endroits opaques des parois du tube de verre — sont parallèles aux bords du film. Ceux qui se rapportent aux derniers centimètres du tube présentent cependant *une inclinaison notable*. Ce fait n'intéresse que les *quatre derniers centimètres du tube de verre* (valeur à peu près indépendante des conditions expérimentales). L'inclinaison est d'autant plus grande que la région correspondant au filet est plus voisine de l'extrémité du tube. Chaque tranche de l'extrémité du tube semble donc se déplacer vers l'avant dès le passage de l'onde de choc. La vitesse de ce déplacement est facilement mesurable d'après la pente des filets.

Nous avons, par suite, été amené à émettre les hypothèses suivantes :

1° La perturbation signalée plus haut est due à la projection en avant de la dernière tranche du tube de verre.

2° Les derniers centimètres du tube sont projetés en avant, par tranches séparées et avec des vitesses différentes (d'autant plus élevées que la tranche est plus voisine de l'extrémité du tube).

Nous proposons de ces phénomènes l'explication suivante, basée sur le fait que le verre perd en grande partie sa cohésion dès le passage de l'onde de choc.

Comme nous l'avons signalé plus haut, on peut assigner au passage de

l'onde une durée de l'ordre de $1/100.000$ de seconde, et à sa vitesse une valeur voisine de 600.000 cm/sec.. A chaque instant les parois du tube de verre sont, sur une longueur de plusieurs centimètres, en état de compression. L'onde ayant vraisemblablement un front très raide, on peut admettre que la pression est, en chaque point, fonction toujours décroissante du temps.

Quand le front de l'onde arrive à l'extrémité du tube, ce sont les derniers centimètres de celui-ci qui sont en état de compression. La dernière tranche de verre, n'ayant rien devant elle pour la retenir, et n'étant plus que faiblement reliée à la tranche précédente, est projetée en avant dès le passage de l'onde, avec une vitesse v fonction de la force de pression f (dirigée dans le sens de propagation de l'onde). Aussitôt après son départ, la tranche précédente est projetée à son tour avec une vitesse v_1 inférieure à v , car correspondant à une force de pression f_1 , inférieure à f . Les tranches de verre sont successivement projetées en avant avec des vitesses initiales décroissantes, jusqu'au moment où la force de pression f_n est insuffisante pour vaincre la cohésion du verre.

Les tranches de verre ont évidemment une certaine épaisseur et le phénomène consiste en une projection d'assez gros éclats. On comprend fort bien, d'après les chiffres indiqués plus haut, pourquoi la projection des éclats n'intéresse que la partie extrême du tube de verre.

Les faits suivants apportent à nos hypothèses une vérification expérimentale satisfaisante.

1° Que le tube soit ou non fixé au tréteau d'explosion, on obtient des résultats identiques.

2° Un détonateur est fixé, à l'aide d'un bouchon de liège, dans l'axe d'un tube de verre de 30 cm. de longueur (fig. 37). Autour du tube, on a collé une bande de papier résistant formant fourreau. Après l'explosion du détonateur, on retrouve le fourreau en papier à peu près intact. A l'intérieur du fourreau le tube brisé, mais non déformé, est resté sur place, *sauf les derniers centimètres qui ont été arrachés*. On retrouve des éclats, sur le tréteau d'explosion, bien en avant du fourreau.

3° Un détonateur est fixé au contact d'une lame de verre à faces parallèles (6 mm. d'épaisseur, 40 cm. de longueur et 3 cm. de largeur) de la manière indiquée précédemment. Après l'explosion, la glace est retrouvée sur le tréteau d'explosion, brisée en assez gros morceaux — jusqu'à 12 à 15 cm. de longueur — tombés aux endroits correspondant à leur position initiale, sauf l'extrémité de la lame dont on ne retrouve que de petits morceaux, projetés bien en avant.

4° Si, normalement à la lame de verre, on tend quelques centimètres en avant, une toile métallique, on remarque après l'explosion que la toile présente un creux très prononcé correspondant au choc de l'extrémité de la lame de verre. Au pied de la toile métallique on peut ramasser de nombreux fragments de verre. La photographie représentée par la *figure 47* correspond à cette expérience (voir ci-dessous la description de cette photographie).

5° Si la toile métallique est recouverte d'une couche de cire molle, on retrouve, dans cette cire, l'extrémité du tube ou de la lame à faces parallèles, brisée en de nombreux fragments.

Voici maintenant quelques résultats numériques concernant la vitesse de propagation des éclats de verre. Cette vitesse dépend de l'homogénéité du verre, mais on constate cependant que les plus grandes valeurs sont observées dans le cas où l'épaisseur des parois est faible. C'est ainsi que la vitesse de l'extrémité d'une lame à faces parallèles passe de 80 à 60 m/sec., quand l'épaisseur croît de 1 à 6 mm. (toutes les dimensions étant égales par ailleurs).

La vitesse de propagation de l'extrémité est toujours comprise entre 50 et 80 m/sec. Elle est constante sur une distance de 15 à 20 cm.

Dans le cas où on utilise une glace de 40 cm. de longueur, 2 cm. de largeur et 5 mm. 5 d'épaisseur, le tableau I reproduit les vitesses mesurées.

TABLEAU I

Vitesse de propagation de la dernière tranche...	66 m./sec.
Vitesse de propagation de la tranche située à 1,5 cm. de l'extrémité.....	44,5 m./sec.
Vitesse de propagation de la tranche située à 2,5 cm. de l'extrémité.....	10 m./sec.

On n'observe une vitesse appréciable que pour les quatre derniers centimètres de la lame environ.

Description des photographies. — La *figure 44* (agrandissement 1,5) est relative à la détonation d'une capsule de fulminate dans un tube en verre vert de 11 mm. de diamètre intérieur, et dont les parois avaient une épaisseur de 3 mm. Le faisceau lumineux traversait les sept derniers centimètres du tube et éclairait 10 cm. au-delà. L'onde de choc est très nettement visible en B C. La projection en avant de l'extrémité du tube est signalée en C D.

En D, cette dernière perturbation est rejointe par les gaz opaques se propageant à plus grande vitesse et qui ont complètement arrêté la lumière suivant D E.

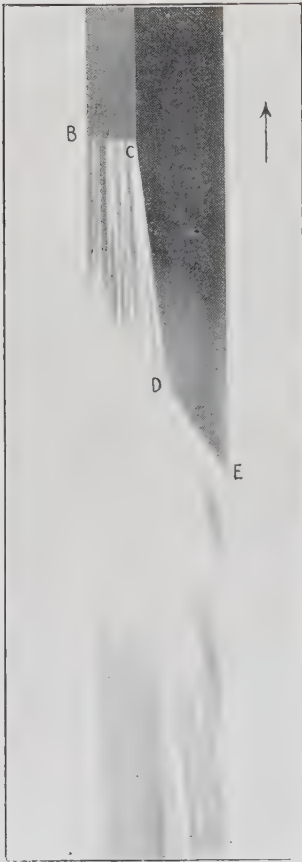


Fig. 44. — Explosion d'un détonateur dans un tube en verre épais, la région éclairée comprenant l'extrémité du tube (B C) et 10 cm. au-delà.

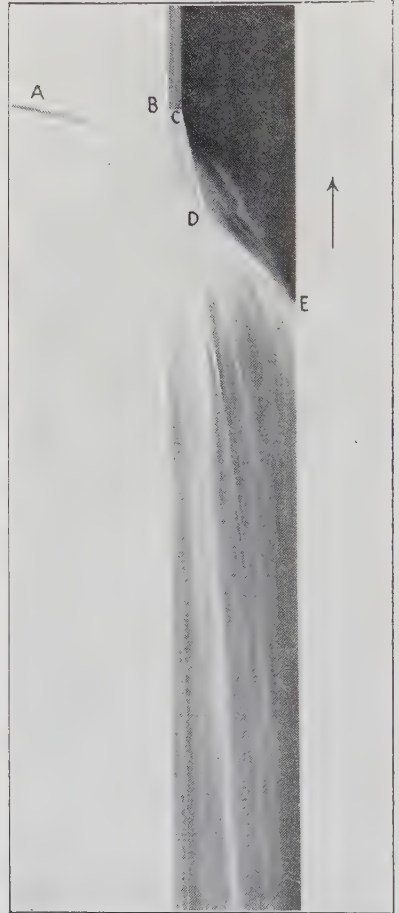


Fig. 45. — Explosion d'un détonateur dans un tube en verre mince, la région éclairée comprenant l'extrémité du tube (B C) et 15 cm. au-delà.

Sur cette photographie et sur les photographies suivantes, on remarque l'inclinaison des filets noirs correspondant, après le passage de l'onde de choc, aux endroits encore transparents du tube de verre. Cette inclinaison



Fig. 46. — Explosion d'un détonateur au contact d'une lame de verre à faces parallèles. La région éclairée comprend les 4 derniers centimètres de la lame (A B) et 12 cm. au-delà.

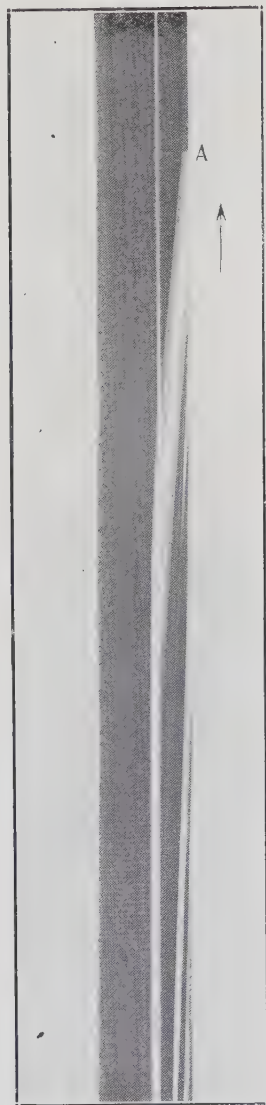


Fig. 47. — Explosion d'un détonateur au contact d'une lame à faces parallèles. La région éclairée comprend l'extrémité de la lame (A) et 15 cm. au-delà. Une toile métallique est tendue 4 cm. en avant de la lame.

n'est appréciable que pour les derniers centimètres du tube et devient de plus en plus importante quand on approche de l'extrémité.

La *figure 45* a été obtenue dans des conditions analogues, mais avec un tube en cristal mince. La région éclairée (à 25 cm. du détonateur) comprend l'extrémité du tube et 15 cm. au-delà. On distingue encore très nettement, sur cette photographie, le phénomène se propageant dans le verre en B C et la projection en avant de l'extrémité du tube en C D. On voit aussi en A les gaz lumineux, et en D E les produits opaques de la détonation. Au-dessus de D E, on remarque une zone assez claire correspondant à la région des compressions produites dans l'atmosphère par la détonation.

La *figure 46* correspond à la détonation, au contact d'une lame de verre à faces parallèles, d'une capsule de fulminate de mercure. Les dimensions de la lame étaient les suivantes : longueur 40 cm, largeur 2 cm., épaisseur 5,5 mm. Le faisceau lumineux traversait les 4 derniers centimètres de la lame et éclairait 12 cm. au-delà. On voit très nettement en A B le phénomène se propageant dans le verre. La projection en avant des différents éclats de verre correspondant à l'extrémité de la lame à faces parallèles est particulièrement bien en évidence sur cette photographie.

La *figure 47* correspond à une expérience décrite précédemment. Une toile métallique (signalée sur la photographie par une ligne blanche verticale) était tendue 4 cm. en avant de la lame à faces parallèles. La région éclairée comprenait l'extrémité de la lame de verre et la région située au-delà. Le phénomène se propageant dans le verre arrive en A à l'extrémité de la lame à faces parallèles. Il est facile de constater le choc des éclats sur la toile et la déformation progressive de celle-ci.

B. — Onde se propageant dans les parois des tubes en acétate de cellulose

En substituant aux tubes de verre des tubes en acétate de cellulose de 0,15 mm. d'épaisseur, nous avons cherché à mettre en évidence la propagation de l'onde de choc dans l'acétate de cellulose.

En adoptant le même dispositif que pour le verre (fig. 37), nous n'avons pas obtenu de résultats satisfaisants pour les raisons suivantes :

1° Il est impossible de construire des tubes en acétate à peu près réguliers quand leur longueur dépasse 50 cm.

2° L'onde dans l'acétate de cellulose, se propage à une vitesse relativement faible, voisine de 2.000 m./sec.

Par suite, si on utilise, pour provoquer l'onde, la détonation d'une colonne d'explosif, l'atmosphère du tube est perturbée par divers phénomènes (onde aérienne de choc, gaz lumineux produits par la détonation) avant le

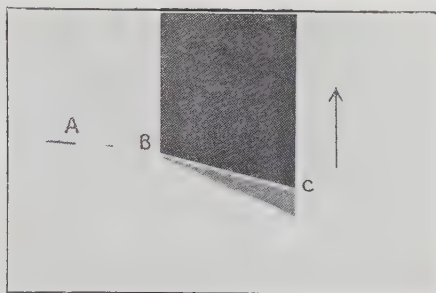


Fig. 48. — Explosion d'une colonne de dynamite dans un tube en acétate de cellulose

passage de l'onde aux endroits correspondants des parois. Il est alors évident que les photographies obtenues ne pourront rien indiquer de précis, concernant la propagation de l'onde dans l'acétate de cellulose.

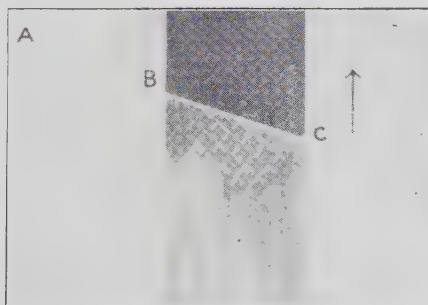


Fig. 49. — Explosion d'un détonateur dans un tube en acétate de cellulose.

D'autre part, l'explosion d'un simple détonateur n° 7 ne semble pas assez puissante pour fournir un bon enregistrement de la propagation de l'onde dans les parois du tube. En outre, dans ce dernier cas, la vitesse de propagation de cette onde devient bien rapidement supérieure à celle des

perturbations aériennes, mais un nouvel inconvénient se présente : la confusion possible entre les éclats de détonateur et l'onde. En effet, la vitesse de ces deux phénomènes peut être souvent du même ordre de grandeur, et la représentation photographique de leur propagation est identique (*figure 48 et 49*).

Nous avons pu enregistrer d'une façon convenable la propagation de l'onde dans l'acétate de cellulose en opérant de la façon suivante :

Une forte charge d'explosif (dynamite-gomme contenant 93 % de nitroglycérine) est disposée de la façon indiquée par la *figure 37* au début d'un tube en acétate de cellulose. Ce tube est ensuite rempli d'eau distillée, puis fermé à l'aide d'un bouchon de caoutchouc. On photographie en éclairant à travers l'eau, assez près de la colonne d'explosif.

Nous avons vérifié que, dans ces conditions, seule l'onde dans les parois du tube est visible sur les photographies. Elle signale son passage par une ligne droite, fine, blanche, coupant la bande sombre. Sa durée est de l'ordre de $1/100.000$ de seconde, sa célérité voisine de 2.000 m./sec. Cette onde ne produit aucun changement permanent de l'acétate de cellulose, contrairement à ce que nous avons observé dans le cas du verre.

La photographie représentée sur la *figure 48* correspond à cette étude (tube rempli d'eau distillée). L'onde dans l'acétate de cellulose s'est propagée, à une vitesse sensiblement constante et égale à 2.000 m/sec. suivant B C. En A, on voit l'image de la détonation de la dynamite. La région éclairée commençait à 5 cm. de l'extrémité de la colonne d'explosif.

La *figure 49* correspond à la détonation d'une amorce de fulminate dans un tube en acétate de cellulose ne contenant pas d'eau. On voit, en B C, une ligne blanche, rectiligne, coupant la bande sombre. Cette ligne B C correspond à un éclat du détonateur dont on voit, en A, l'image de la détonation. Cette photographie montre combien la confusion serait facile entre les éclats et l'onde dans les parois du tube, si on opérait de cette manière.

C. — Onde de choc aérienne

Nous avons vu qu'il était impossible d'étudier l'onde de choc en opérant dans des tubes de verre. Nous avons songé tout d'abord à utiliser des tubes en acétate de cellulose, dans les parois desquels l'onde se propage à une vitesse relativement faible et sans modifier la transparence. Mais celle-ci n'est cependant pas suffisante et, d'autre part, ces tubes se déforment rapidement; on doit les utiliser dès leur préparation.

Aussi, avons-nous finalement adopté le dispositif suivant :

Le détonateur (et le cas échéant la colonne d'explosif) sont placés dans un tube en verre mince (*fig. 50*), de longueur variable suivant les expériences. Dans l'extrémité de ce tube, opposée à celle contenant l'explosif, pénètre, sur 2 ou 3 cm., un tube métallique à fentes t' , dont le diamètre extérieur est très légèrement inférieur au diamètre intérieur du tube de verre. On assure un joint étanche j entre les deux tubes avec un mélange de soufre et d'aluminium pulvérisé que l'on chauffe convenablement. Le tube métallique a 25 cm. de longueur et ses parois ont 1 mm. d'épaisseur. Il comporte deux fentes parallèles symétriques par rapport à l'axe du tube ; elles ont 20 cm. de longueur et 1,5 mm. de largeur. On les dispose dans un plan horizontal, de manière à ce qu'elles soient traversées par le faisceau lumineux émané de la lampe à arc.

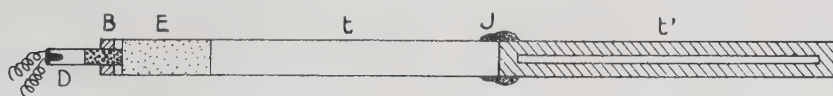


Fig. 50.

Ce dispositif ne permet pas — en raison des fentes du tube métallique — d'enregistrer la propagation d'une onde de choc plane. En recouvrant les fentes du tube avec des bandelettes de cellophane, nous avons vérifié que l'allure des phénomènes n'est pas modifiée et que l'amortissement de la vitesse de l'onde de choc et des gaz lumineux causée par les fentes est somme toute, peu considérable. Comme, d'autre part, il est possible de rendre les résultats numériques absolument indépendants des fentes du tube métallique (nous indiquerons plus loin de quelle manière), la grande majorité de nos expériences ont été exécutées sans recouvrir les fentes.

Nous avons pu mettre en évidence les faits suivants :

Lorsqu'on fait détoner un explosif dans un tube cylindrique, il se propage, au-delà de la dernière tranche d'explosif, une onde de choc non lumineuse, en même temps que des gaz lumineux sont lancés en avant. Au début, les vitesses de propagation de ces deux phénomènes sont identiques, c'est-à-dire que leurs fronts coïncident. Mais la vitesse des gaz (phénomènes lumineux) s'amortit plus rapidement que celle de l'onde de choc, et il arrive un moment où les deux phénomènes se séparent, l'onde de choc précédant alors les gaz lumineux. Après cette séparation, l'onde de choc poursuit sa propagation à une vitesse de moins en moins grande. Quant aux gaz, ils

cessent rapidement d'être suffisamment lumineux pour impressionner le papier sensible.

La *figure 51* représente schématiquement les résultats obtenus. Sa description aidera à comprendre les photographies.

Jusqu'à une certaine distance de la colonne d'explosif (point de séparation A), la bande lumineuse due à la lampe à arc est coupée par l'image des gaz lumineux. Après le passage de ces phénomènes, la lumière de la lampe est interrompue, par suite des produits opaques dus à l'explosion.

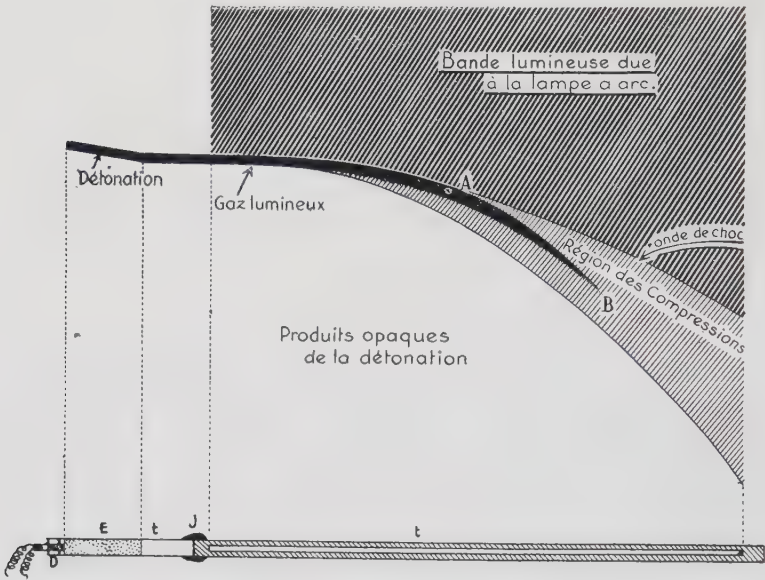


Fig. 51.

A partir du point A, où il y a séparation entre les gaz lumineux et l'onde de choc, on voit sur les photographies, au-dessus de l'image des gaz lumineux, une zone plus claire; elle est produite par la déviation d'une partie de la lumière de la lampe à arc par l'onde de choc précédant les gaz lumineux. En arrière de l'onde de choc, la pression ne revient pas immédiatement à sa valeur primitive; il y a sur les photographies une zone grise qui est la région des compressions. La lumière de la lampe à arc est ensuite presque complètement arrêtée par des produits opaques de la détonation se déplaçant à une vitesse relativement faible.

Enfin, au delà du point B, les gaz en combustion ne sont plus suffisamment lumineux pour impressionner le papier sensible.

Cas particulier des détonateurs. — Si on se propose d'étudier les phénomènes provoqués par l'explosion d'un simple détonateur, on a intérêt à modifier le dispositif représenté sur la *figure 50*. En effet, le fond de l'enveloppe métallique du détonateur constitue un gros éclat, dont la trajectoire est nettement visible sur les photographies. Dans la plupart des cas, cette trajectoire, mêlée aux autres phénomènes, rend l'ensemble assez confus.

Pour éviter cet inconvénient, nous avons eu recours à l'artifice représenté sur la *figure 52*. Deux détonateurs sont maintenus bout à bout, les extrémités en contact, grâce à un bouchon de liège B. La détonation du



Fig. 52.

premier provoque celle du second. En ce qui concerne les phénomènes qui nous intéressent, tout se passe comme si on utilisait un détonateur ouvert aux deux extrémités.

Description des photographies. — Les photographies reproduites par les *figures 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64*, correspondent à ces phénomènes. La flèche indique le sens de déplacement du film. La bande noire verticale correspond au faisceau émané de la lampe à arc, et ayant traversé, sur une longueur de 16 cm., les fentes du tube métallique. La détonation de l'explosif n'a pas lieu en général dans le champ de l'objectif. Elle serait sur la gauche de la photographie.

La photographie de la *figure 53* (agrandissement 1,5) a été obtenue avec un simple détonateur disposé de la manière indiquée par la *figure 50*. Le tube de verre et le tube à fentes avaient respectivement 13 mm. et 10 mm. de diamètre intérieur. Le tube à fentes était placé à 10 cm. de l'extrémité du détonateur. L'image de la détonation est en A sur la photographie. La séparation de l'onde de choc et des gaz lumineux a eu lieu avant le début de la région éclairée. Les gaz lumineux ont cessé d'impressionner le papier sensible un peu au dessous de B. à la fin du tube de verre et au commencement du tube à fentes. Mais à partir de B, on voit très nettement la différence de teinte due au passage de l'onde de choc dans la zone éclairée. La

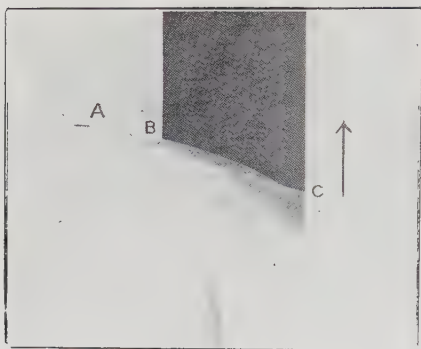


Fig. 53. — Explosion d'un détonateur.
La séparation a lieu avant la région éclairée

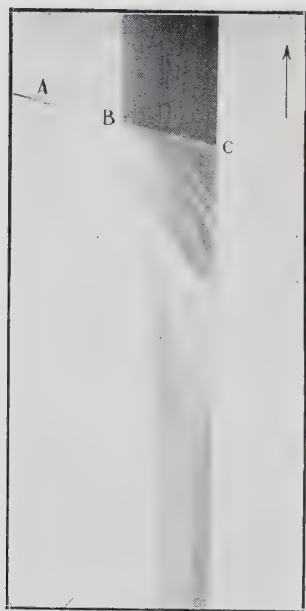


Fig. 54. — Explosion d'un détonateur.

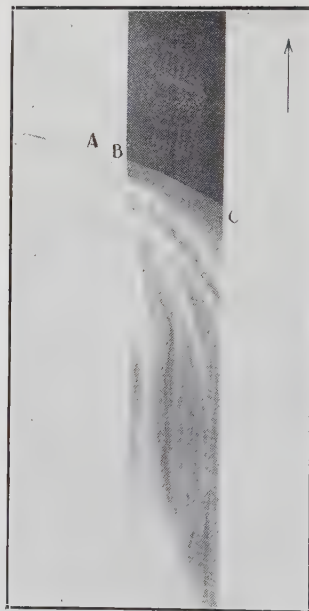


Fig. 55. — Explosion de deux détonateurs placés bout à bout. La séparation a lieu avant la région éclairée.

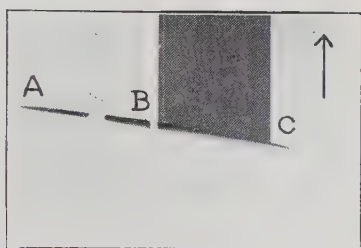


Fig. 56. — Détonation d'une colonne de tétyl. La région éclairée est avant la séparation.

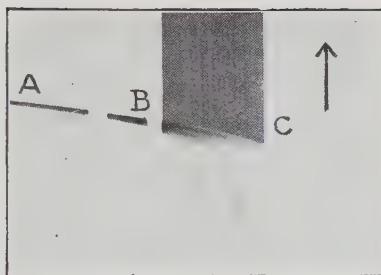


Fig. 57. — Détonation d'une colonne de tétyl. La séparation a lieu dans la région éclairée.

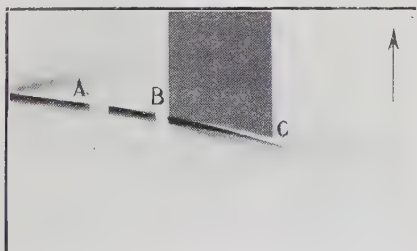


Fig. 58. — Détonation d'une colonne d'acide picrique. La séparation a lieu au début de la région éclairée.

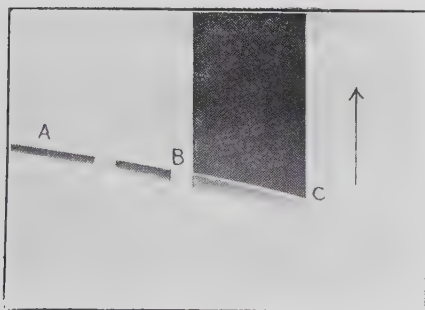


Fig. 59. — Détonation d'une colonne de dynamite. La séparation a lieu un peu avant la région éclairée.

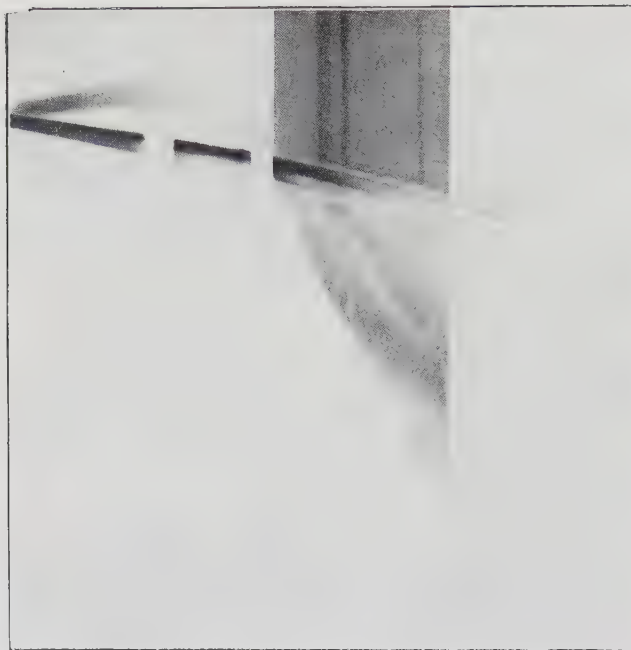


Fig. 60. — Détonation d'une colonne de tétryl.
La séparation a lieu au début de la région éclairée.

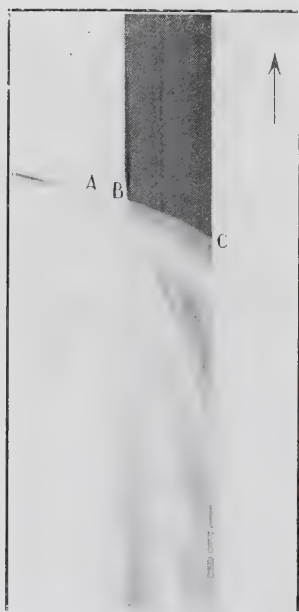


Fig. 61. — Détonation d'une colonne de dynamite. La région éclairée est après la séparation.

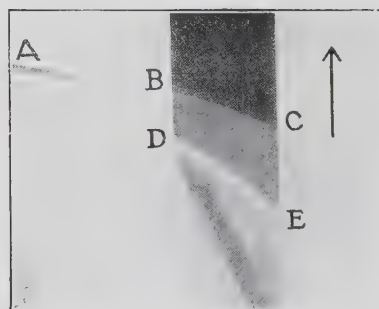


Fig. 62. — Détonation d'une colonne de tétryl. La région éclairée est après la séparation.

partie supérieure — beaucoup plus claire — de la région des compressions correspond au passage de l'onde de choc proprement dite. En C, on voit l'extrémité d'un trait blanc rectiligne, dû au passage d'un gros éclat de

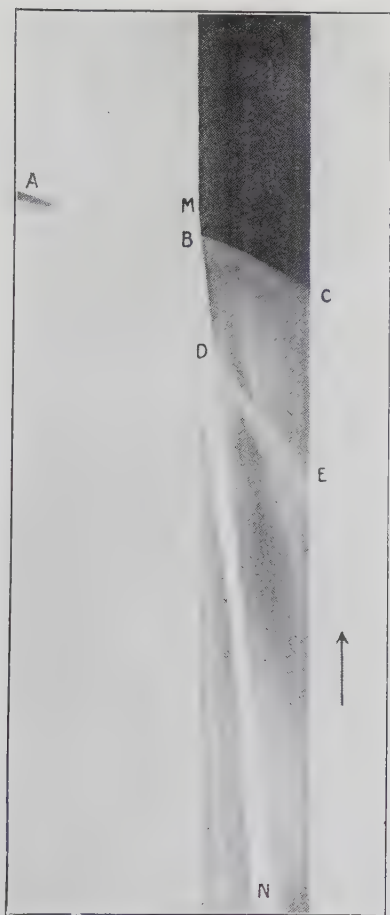


Fig. 63. — Détonation d'une colonne de tétryl. La région éclairée est après la séparation.

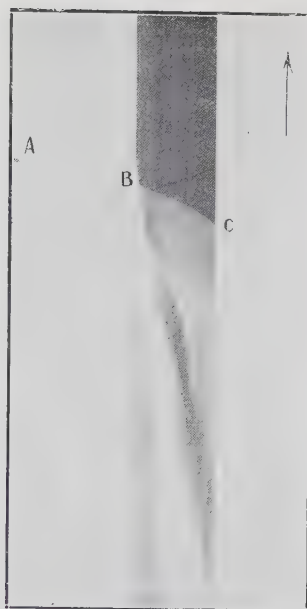


Fig. 64. — Détonation d'une colonne d'acide picrique. La région éclairée est après la séparation.

détonateur. La vitesse de cet éclat, de l'ordre de 2.000 m/sec., est presque constante sur ce faible parcours. Il a rejoint et dépassé l'onde de choc un peu avant de parvenir en C.

La photographie reproduite par la *figure 54* (agrandissement 1,2) a été également obtenue en utilisant un simple détonateur au fulminate. Le tube de verre et le tube à fentes avaient respectivement 9 mm. et 7 mm. de diamètre intérieur. Le tube à fentes était disposé à 25 cm. du détonateur. L'explosion de celui-ci a eu lieu en dehors du champ de l'objectif. En A, on voit la fin de l'image des gaz lumineux. En B C se trouve la trajectoire de l'éclat formé par l'extrémité du détonateur. La vitesse de cet éclat est voisine de 2.000 m/sec. et ne s'amortit que d'une façon insensible. En B, il a déjà dépassé l'onde de choc. Après le passage de l'éclat, l'air ne revient pas immédiatement à son état normal, de sorte qu'il est impossible de distinguer sur cette photographie le passage de l'onde de choc dans la région éclairée. Cette photographie, de même que la précédente, montre bien la nécessité d'éliminer toute projection d'éclats quand on désire étudier l'onde de choc.

La photographie reproduite par la *figure 55* (agrandissement 1,2) a été obtenue par l'explosion de deux détonateurs, placés bout à bout de la manière indiquée par la *figure 52*. Le tube de verre et le tube à fentes avaient respectivement 13 mm. et 10 mm. 5 de diamètre intérieur. Le tube à fentes était placé à 20 cm. de l'explosif. La détonation, de ce dernier a eu lieu en dehors du champ de l'objectif. Les gaz lumineux, dont on voit l'image en A, ont cessé d'impressionner le papier sensible quelques centimètres avant leur arrivée dans le tube métallique. En B C, l'onde de choc a signalé son passage en déviant une partie de la lumière arrivant sur la pellicule sensible. La séparation de l'onde de choc et des gaz s'est produite à 10 cm. de l'explosif, c'est-à-dire 10 cm. avant la région éclairée. Les éclats se trouvant supprimés grâce à la disposition des détonateurs, il est facile de mesurer la vitesse de l'onde de choc en chaque point de la région éclairée. Sur cette photographie et sur la photographie précédente, les produits opaques de la détonation ne sont pas suffisamment importants pour arrêter complètement la lumière de la lampe à arc.

La photographie reproduite par la *figure 56* (agrandissement 1,2), est relative à la détonation d'une colonne de tétryl (densité de chargement 0,9) de 10 cm. de longueur. Le tube de verre et le tube à fentes avaient respectivement 13 mm. et 10 mm. de diamètre intérieur. Le tube métallique était disposé à 30 cm. de la fin de la colonne d'explosif. La détonation a eu lieu en dehors du champ de l'objectif. En A B C on voit l'image des gaz lumineux lancés en avant par la détonation. En C, à la fin de la région éclairée, il n'y a pas encore eu séparation entre l'onde de choc et les gaz, de sorte que l'onde de choc n'est pas visible. Après le passage des

phénomènes lumineux, on remarquera que la lumière émanée de la lampe à arc ne réapparaît pas, grâce aux produits opaques de la détonation.

La photographie reproduite par la *figure 57* est relative à la détonation d'une colonne de tétryl (densité de chargement 0,7) de 10 cm. de longueur. Le tube de verre et le tube métallique avaient respectivement 13 mm. et 10 mm. de diamètre intérieur. Le tube métallique était disposé à 40 cm. de la fin de la colonne d'explosif. La détonation a eu lieu en dehors du champ de l'objectif. En A B, on voit l'image des gaz lumineux. A 45 cm. de l'explosif, soit un peu avant le milieu de la région éclairée, s'est produite la séparation de l'onde de choc et des gaz. L'onde de choc a dévié la lumière de la lampe à arc, produisant la zone blanche juste au-dessus de l'image des gaz lumineux. Sur cette photographie, la lumière émanée de la lampe à arc ne réapparaît pas après le passage de ces phénomènes. Cette interruption est due, comme précédemment, aux produits opaques de la détonation (La reproduction correspond à un agrandissement 1,2).

La photographie reproduite par la *figure 58* (agrandissement 1,2) est relative à la détonation d'une colonne d'acide picrique (densité de chargement 1,1) de 10 cm. de longueur. Le tube de verre et le tube à fentes avaient encore respectivement 13 mm. et 10 mm. de diamètre intérieur. Le tube métallique était disposé à 37 cm. de la fin de la colonne d'explosif. La détonation a eu lieu en dehors du champ de l'objectif. En A B, on voit l'image des gaz lumineux. Presque au début de la région éclairée s'est produite la séparation de l'onde et des gaz (à 40 cm. environ de l'explosif). On voit très nettement la zone plus claire, due à l'onde de choc, située au-dessus de l'image des gaz lumineux.

La *figure 59* correspond à la détonation d'une colonne de dynamite (densité de chargement 1,6) de 10 cm. de longueur. Le tube de verre et le tube métallique avaient respectivement 13 et 10 mm. de diamètre intérieur. Le tube métallique était disposé à 65 cm. de la fin de la colonne de dynamite. On voit, en A B, l'image des gaz lumineux. La séparation des gaz lumineux et de l'onde de choc a eu lieu un peu avant le début de la région éclairée (à 58 cm. environ de la colonne d'explosif). Au-dessus de l'image des gaz lumineux, on voit la zone claire due à l'onde de choc (La reproduction correspond à un agrandissement 1,2).

La *figure 60* représente (agrandissement 2) les phénomènes obtenus par la détonation d'une colonne de tétryl (densité de chargement 0,7), de 10 cm. de longueur. Le tube métallique à fentes était disposé à 53 cm. de la colonne

d'explosif. Les diamètres intérieurs des tubes étaient les mêmes que dans le cas précédent. La séparation de l'onde et des gaz a eu lieu juste au début de la région éclairée. Sur cette photographie, on peut remarquer que la lumière de la lampe à arc n'est pas complètement interrompue après le passage des phénomènes lumineux.

La photographie reproduite sur la *figure 61* est relative à la détonation d'une colonne de dynamite (densité de chargement 1,2) de 3 cm. de longueur. Le tube de verre et le tube à fentes avaient respectivement 12,5 et 10 mm. de diamètre intérieur. Le tube à fentes était placé à 67 cm. de l'explosif. La séparation de l'onde de choc a eu lieu à 50 cm. de l'explosif, donc 17 cm. avant le début de la région éclairée. Les gaz lumineux sont visibles en A jusqu'au début de la région éclairée. En B C, l'onde de choc a dévié une partie de la lumière de la lampe à arc arrivant dans l'objectif. En dessous de la région des compressions, on peut remarquer une zone complètement blanche, correspondant au passage des produits opaques de la détonation.

La photographie représentée par la *figure 62* (agrandissement 1,2), correspond à la détonation d'une colonne de tétryl de 10 cm. de longueur, sous une densité de chargement de 0,7. Le tube de verre avait 13 mm., le tube métallique 10 mm. de diamètre intérieur. La distance du tube à fentes à la colonne d'explosif était égale à 60 cm. La séparation de l'onde de choc et des gaz a eu lieu à 40 cm. de l'explosif, c'est-à-dire 20 cm. avant la région éclairée. Les gaz lumineux ont cessé d'impressionner le papier sensible en A. En B C, l'onde de choc a dévié une partie de la lumière de la lampe à arc arrivant dans l'objectif. Un peu au-dessous de B, on voit (plus nettement sur l'original que sur la reproduction), un trait sombre qui est le prolongement des gaz lumineux s'arrêtant en A. Ces gaz étaient insuffisamment photogéniques pour impressionner le film entre A et B, mais ils ont renforcé la lumière de la lampe à arc et ont produit une tache sombre en dessous de B. Enfin, en D E, les produits opaques de la détonation ont presque complètement arrêté la lumière parvenant à l'objectif.

La photographie (agrandissement 1,4) représentée par la *figure 63* a été obtenue par la détonation d'une colonne de tétryl (densité de chargement 0,55) de 4 cm. de longueur. Le tube de verre et le tube à fentes avaient respectivement 12 mm. et 9 mm. de diamètre intérieur. Le tube métallique était disposé à 60 cm. de la fin de la colonne d'explosif. La séparation entre l'onde de choc et les gaz s'est produite à 35 cm. de l'explosif, c'est-à-dire 25 cm. avant le début de la région éclairée. On voit

sur cette photographie, comme sur les précédentes : en A, la fin de l'image des gaz lumineux ; en B C, l'onde de choc ; en D E, l'interruption de la lumière de la lampe à arc par les produits opaques de la détonation. Sur cette photographie on peut remarquer en M N la perturbation causée par la projection en avant de l'extrémité du tube de verre (voir page 114). Cette perturbation précède, au début de la région éclairée, l'onde de choc elle-même.

La *figure 64* (agrandissement 1,2) est à peu près analogue à la précédente. Elle a été obtenue par la détonation d'une colonne d'acide picrique (densité de chargement 0,7) de 10 cm. de longueur. Le tube de verre et le tube métallique avaient respectivement 13 mm. et 10 mm. de diamètre intérieur. Le tube à fentes était placé à 60 cm. de la fin de la colonne d'explosif. Dans ces conditions expérimentales, la séparation de l'onde de choc et des gaz lumineux s'est produite à 30 cm. de l'explosif, donc 30 cm. avant le tube à fentes. On observe sur la photographie : en A la fin de l'image des gaz lumineux ; en B C, l'onde de choc. Comme sur la *figure 63*, la perturbation causée par la projection de l'extrémité du tube de verre est nettement visible.

RESULTATS NUMERIQUES

I. — *Séparation de l'onde de choc et des gaz lumineux.* — Nous avons mesuré avec différents explosifs, la distance D au bout de laquelle se séparent l'onde de choc et les gaz lumineux.

Pour éliminer l'influence des fentes du tube métallique, on fait en sorte que la séparation ait lieu juste au début des fentes. En faisant varier la longueur du tube de verre, il est toujours possible de se placer dans ces conditions. Les valeurs D mesurées correspondent par conséquent à la séparation de l'onde de choc plane et des gaz lumineux, dans des tubes de verre de différents diamètres.

Cette distance D est fonction de différents facteurs. Nous avons successivement étudié l'influence de la densité de chargement (Δ), du diamètre du tube (d), de la longueur de la colonne d'explosif (l).

L'influence de la densité de chargement est donnée par le tableau II.

TABLEAU II

$l = 10$ cm. $d = 13$ mm.

Tétryl		Dynamite n° 1		Acide picrique		Fulminate de Hg	
Δ gr/cm ³	D cm.	Δ gr/cm ³	D cm.	Δ gr/cm ³	D cm.	Δ gr/cm ³	D cm.
0,55	35	0,9	35	0,7	30	1,45	28
0,65	45	1,2	50	1	50		
0,90	55	1,65	58				

Le tableau III indique l'influence du diamètre du tube, dans le cas du tétryl et du fulminate de mercure.

TABLEAU III

Tétryl		Fulminate de mercure	
$\Delta = 0,9$ gr/cm ³ $l = 10$ cm.		$\Delta = 1,45$ gr/cm ³ $l = 10$ cm.	
d mm.	D cm.	d mm.	D cm.
11	45	10,5	19
13	55	13	28
16	65		

L'influence de la longueur de la colonne d'explosif est donnée par le tableau IV dans le cas du tétryl.

TABLEAU IV

$\Delta = 0,9$ gr/cm³ $d = 13$ mm.

l cm.	1	1,5	3	6	14
D cm.	50	55	55	52	55

Il faut noter qu'il est difficile d'obtenir des colonnes d'explosif dont la densité de chargement soit bien constante sur toute leur longueur.

Comme l n'a qu'une influence négligeable sur la distance D , seule la densité des derniers centimètres de la colonne d'explosif intervient. D'autre part, on n'obtient que très difficilement une colonne d'explosif se terminant par une base bien plane et perpendiculaire aux génératrices du tube (surtout dans le cas du tétryl et plus encore dans celui du fulminate de mercure), et ceci semble avoir une influence appréciable sur la distance D).

Dans le cas où la séparation de l'onde de choc et des gaz ne se produit pas dès le début du tube à fentes, la distance D se trouve modifiée. Par exemple, dans le cas d'une colonne de tétryl ($\Delta = 0,9$, $d = 13$ cm.), elle est réduite à 50 cm. (au lieu de 55 cm.) quand le tube à fentes est disposé à 35 cm. seulement de la colonne d'explosif. Le passage des gaz et de l'onde de choc dans le tube à fentes facilite donc la séparation. Il est par suite très probable que si l'explosif était tiré à l'air libre, on observerait la séparation des deux phénomènes à une distance relativement faible de la cartouche.

En résumé, la séparation de l'onde de choc et des gaz lumineux se produit à une distance D de la colonne d'explosif d'autant plus grande que :

1° Le diamètre de la cartouche est plus élevé.

2° La densité de chargement est plus forte.

Elle ne dépend pas de la longueur de la colonne d'explosif. Elle est plus grande lorsque l'explosif est contenu dans un tube de verre que lorsqu'il est tiré à l'air libre.

La distance D nous semble être, au point de vue des effets à distance, une caractéristique importante de la détonation. Avant la séparation, la propagation simultanée de l'onde de choc et des gaz lumineux en combustion, réalise, en dehors de l'explosif, un phénomène présentant une grande analogie avec la propagation de l'onde explosive. C'est en quelque sorte, le *prolongement dans l'atmosphère de l'onde explosive*. Après la séparation, il n'en est pas de même, le phénomène mécanique et le phénomène chimique n'ont plus aucun lien entre eux.

II. — *Vitesse de propagation des gaz lumineux et de l'onde de choc.* — En laissant constants la longueur de la colonne d'explosif (10 cm.) et le diamètre du tube de verre (13 cm.), nous avons tout d'abord mesuré les vitesses de propagation des gaz lumineux et de l'onde de choc pour divers explosifs. Les résultats sont donnés par les tableaux V (dynamite),

VI (tétryl), VII (acide picrique), VIII (fulminate de mercure), IX (détonateurs à l'azoture de plomb). V désigne la vitesse de détonation, V_1 et V_2 celles de l'onde de choc et des gaz lumineux à des distances variables, L, de la fin de la colonne d'explosif.

Ces résultats sont indépendants des fentes du tube métallique. Ils correspondent à la propagation de l'onde de choc plane et des gaz lumineux dans des tubes de verre de 13 mm. de diamètre. En effet, ces vitesses ont été déduites de la détermination, sur les photographies, de la pente des tangentes aux images représentant l'onde de choc et les gaz, aux points correspondant à l'arrivée de ces phénomènes dans le tube métallique. Cela est toujours possible si le début de la région éclairée coïncide avec le début des fentes. En faisant varier la longueur du tube de verre, on peut mesurer ainsi les vitesses V_1 et V_2 à des distances variables de la colonne d'explosif.

TABLEAU V

Dynamite n° 1.

a) $\Delta = 0,90$ $V = 2.500$ m./sec.						
L (cm.)	1 à 5	20	35	45	54	60
V_1 (m./sec.)	4000	2500	2200	1800	1300	830
V_2 (m./sec.)	4000	2500	1800			
b) $\Delta = 1,25$ $V = 4.000$ m./sec.						
L (cm.)	1 à 3	5	18	30	46	54
V_1 (m./sec.)	6000	5500	4000	3200	2250	2200
V_2 (m./sec.)	6000	5500	4000	3200		1900
c) $\Delta = 1,65$ $V = 7.000$ m./sec.						
L (cm.)	1 à 3	25	45	50	60	
V_1 (m./sec.)	6500	5000	4000	3700	3000	
V_2 (m./sec.)	6500	5000	4000	3700	2700	

TABLEAU VI

Tétryl.

a) $\Delta = 0,55$ $V = 3.700$ m./sec.						
L (cm.)	1 à 3	25	35	40	45	60
V_1 (m./sec.)	6500	3000		2650		1600
V_2 (m./sec.)	6500	3000	2450		1500	
b) $\Delta = 0,65$ $V = 4.000$ m./sec.						
L (cm.)	1 à 3	20	40	45	50	60
V_1 (m./sec.)	6500	4000	3500		2800	2170
V_2 (m./sec.)	6500	4000		2700	2400	
c) $\Delta = 0,90$ $V = 5.000$ m./sec.						
L (cm.)	1 à 3	30	50	60		
V_1 (m./sec.)		6250	4000	3500	2700	
V_2 (m./sec.)		6250	4000	3500	2000	

TABLEAU VII

Acide picrique.

a) $\Delta = 0,70$ $V = 3.500$ m./sec.							
L (cm.)	1 à 3	20	35	40	45	50	60
V_1 (m./sec.)	6000	3300		2550		1850	1750
V_2 (m./sec.)	6000	3300	2250		1800		
b) $\Delta = 1$ $V = 4.500$ m./sec.							
L (cm.)	1 à 3	20	35	50	55	60	
V_1 (m./sec.)	6000	4000	3600	3500		2800	
V_2 (m./sec.)	6000	4000	3600	3200	3000		

TABLEAU VIII
Fulminate de mercure.

$$\Delta = 1,5 \quad V = 3.300 \text{ m./sec.}$$

L (cm.)	1 à 3	12	20	30	35	40	50
V ₁ (m./sec.)	6100	3300	2900	2500	2300	2000	1750
V ₂ (m./sec.)	6100	3300	2900	2250	2000		

TABLEAU IX
Détonateurs contenant 1 gr. 5 d'azoture de plomb.
(2 détonateurs bout à bout).

Δ et V ne sont pas connus

L (cm.)	1 à 2	5	10	12	15	20	25
V ₁ (m./sec.)	5900	2600	2300		2000	1450	1100
V ₂ (m./sec.)	5900	2600		1700	1400		

La vitesse de l'onde de choc, de même que celle des gaz lumineux est, dans une certaine mesure, fonction du diamètre d du tube de verre. Les tableaux X, XI, XII correspondent respectivement au tétryl, à la dynamite n° 1, et au fulminate de mercure.

TABLEAU X
Tétryl.

$$\Delta = 0,9 \quad l = 10 \text{ cm.}$$

d (mm.).....	11	13	16
V (m./sec.).....	4500	5000	5200
V ₁ (m./sec.) pour L = 1 à 3 cm.	6000	6250	6250
V ₁ pour L = 25 cm.....	3500	4000	4600
V ₁ pour L = 40 cm.....	3100	3800	4500

TABLEAU XI

Dynamite n° 1.

$$\Delta = 1,65 \quad l = 10 \text{ cm.}$$

d (mm.).....	13	16
V (m./sec.).....	7000	7500
V_1 (m./sec.) pour $L = 1$ à 3 cm....	6500	6300
V_1 pour $L = 25$ cm.....	5000	5000
V_1 pour $L = 50$ cm.....	3700	4000
V_1 pour $L = 60$ cm.....	3000	4000

TABLEAU XII

Fulminate de mercure.

$$\Delta = 1,5 \quad l = 10 \text{ cm.}$$

d (mm.).....	10,5	13
V (m./sec.).....	2900	3300
V_1 (m./sec.) pour $L = 20$ cm.....	2650	2900
V_1 pour $L = 30$ cm.....	2000	2500
V_1 pour $L = 40$ cm.....	1650	2000
V_1 pour $L = 50$ cm.....	1300	1750

V_1 (comme D) semble indépendant de la longueur l de la colonne d'explosif (tout au moins pour des valeurs de l supérieures à 1 cm. et pour des tubes de diamètre supérieur à 8 mm.). Les tableaux XIII et XIV correspondent respectivement au tétryl et à la dynamite n° 1.

TABLEAU XIII

Tétryl.

$$\Delta = 0,9 \quad d = 13 \text{ mm.}$$

l (cm.).....	1,5	5	10
V_1 (m./sec.) pour $L = 1$ à 3 cm.....	6000	6300	6250
V_1 pour $L = 25$ cm.....	4000	4200	4000
V_1 pour $L = 40$ cm.....	3900	3700	3800

TABLEAU XIV

Dynamite n° 1.

$$\Delta = 1,65 \quad d = 13 \text{ mm.}$$

l (cm.).....	1,5	5	10
V_1 (m./sec.) pour $L = 1$ à 3 cm.....	6500	6300	6500
V_1 pour $L = 25$ cm.....	4900	5000	5000
V_1 pour $L = 50$ cm.....	3800	3800	3700

En résumé, dans des conditions déterminées, les vitesses V_1 et V_2 de l'onde de choc et des gaz lumineux sont d'autant plus faibles que la distance L est plus grande.

Pour une valeur de L donnée, V_1 et V_2 sont : 1° d'autant plus grands que la densité de chargement Δ et le diamètre du tube de verre d sont plus élevés ; 2° indépendants de la longueur l de la colonne d'explosif.

Approximation des résultats numériques. — Les valeurs indiquées pour Δ correspondent à des déterminations précises de la densité moyenne de chargement des colonnes d'explosif. Malheureusement, comme nous l'avons déjà signalé, la densité de chargement n'est généralement pas constante sur toute la longueur de la colonne. Comme du point de vue qui nous intéresse, c'est la densité de chargement de la partie terminale qu'il faudrait connaître, une erreur assez importante peut entacher les déterminations de Δ ; grâce aux précautions prises pour obtenir des colonnes d'explosif aussi homogènes que possible, l'erreur ne dépasse certainement pas $\pm 5 \%$.

La vitesse de déplacement du film sensible est connue avec une grande précision. Le tracé des tangentes aux courbes (front de l'onde de choc et front des phénomènes lumineux) est une opération délicate; une erreur assez importante peut en résulter. Nous avons vérifié que, pour cette raison, les valeurs mesurées pour V_1 et V_2 ne sont exactes qu'à 5 % près environ.

Les valeurs de V_1 et V_2 sont, sauf pour de très faibles valeurs de L , fonction de Δ . En définitive, si on convient de considérer comme *exactes* les valeurs de Δ *données*, l'erreur possible peut atteindre 5 % pour les valeurs de L , et 10 % pour les valeurs de V_1 et V_2 . Les résultats portés sur les tableaux précédents sont, pour la plupart, la moyenne des résultats de deux expériences.

Remarques. — I. Sauf pour de très faibles valeurs de la densité de chargement Δ , la vitesse de l'onde de choc et des gaz lumineux, sur les tout premiers centimètres de leur parcours, est (aux erreurs d'expériences près), *indépendante* des conditions expérimentales. Cette vitesse voisine de 6200 m/sec. est donc indépendante de la violence de l'ébranlement. *On peut la considérer comme la vitesse limite de propagation des ébranlements dans l'air.*

Cette vitesse ne dépend en aucune façon de la vitesse de détonation. Bien plus grande que celle-ci quand on utilise un explosif faiblement comprimé, elle peut être, dans certains cas, du même ordre de grandeur, ou même un peu plus faible (dynamite n° 1; $\Delta = 1,65$).

Par contre, pour un explosif déterminé, cette vitesse s'amortit d'autant plus rapidement que la densité de chargement et le diamètre du tube sont plus faibles.

Les photographies représentées sur la *figure 65* illustrent ces derniers résultats. Elles ont été obtenues en faisant détoner, dans des tubes de verre de 13 mm. de diamètre, des colonnes de dynamite de 10 cm. de longueur. Deux bandes de papier opaque, collées sur le tube, permettent, la première de repérer la fin de la colonne d'explosif, la seconde (placée à 20 cm. de la précédente), de comparer l'amortissement de la vitesse des gaz lumineux.

La première photographie correspond à une densité de chargement 0,9. L'onde explosive s'est propagée en A B, à la vitesse de 2500 m/sec. L'onde de choc et les gaz lumineux prennent naissance en B. La vitesse initiale de ces deux phénomènes est voisine de 6000 m/sec. Elle s'amortit très rapidement et n'est plus que 2500 m/sec. à 20 cm. de la fin de la colonne de dynamite.

La seconde photographie correspond à une densité de chargement 1,65. L'onde explosive s'est propagée en A B, à la vitesse de 7000 m/sec. La

vitesse initiale des gaz lumineux et de l'onde de choc (constante sur 4 ou 5 cm.), est voisine de 6300 m/sec. A 25 cm. de la colonne d'explosif, la vitesse de propagation de ces phénomènes est encore de 5000 m/sec.

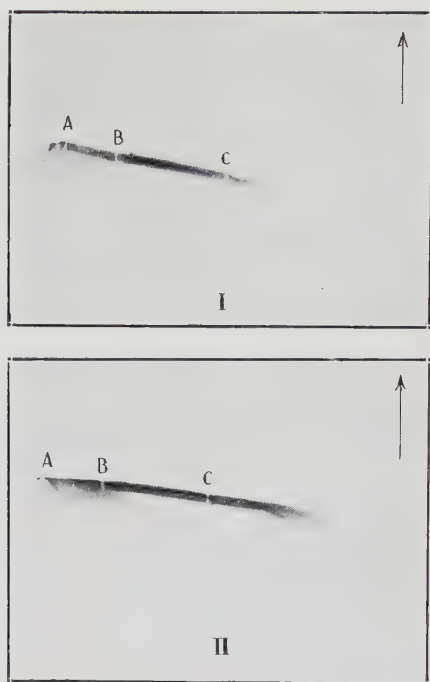


Fig. 65. — Détonation et gaz lumineux produits par une colonne de dynamite disposée dans un tube de verre de 13 mm. de diamètre.

I — $\Delta = 0,9$ II — $\Delta = 1,65$

II: — PAYMAN *et ses Collaborateurs* (2) en 1926, GAWTHROP, SHEPHERD et PERROTT (3) (postérieurement à nous) en 1931, ont publié les résultats de recherches présentant une certaine analogie avec les nôtres.

Ces auteurs, utilisant la méthode « Schlieren », ont étudié l'onde de choc produite par l'explosion de détonateurs (PAYMAN), ou de petites cartouches d'explosifs de mine (GAWTHROP).

Les expériences de PAYMAN sont difficiles à rapprocher des nôtres qui portent sur des charges d'explosif souvent supérieures à 30 gr. D'ailleurs, elles concernent exclusivement l'onde de choc produite par l'explosion de détonateurs de différentes puissances. La région photographiée étant

toujours située à une assez grande distance du détonateur les gaz lumineux sont très rarement visibles sur les photographies. Les mesures faites par PAYMAN ont porté uniquement sur la vitesse de propagation de l'onde de choc à différentes distances de l'explosif.

Les expériences de GAWTHROP, SHEPHERD, PERROTT, sont plus proches des nôtres. Elles aboutissent à des résultats parfois comparables aux nôtres, et en bon accord avec eux.

En résumé :

En faisant détoner un explosif dans un tube de verre, nous avons montré, dans la première partie de ce chapitre, qu'il se propage une *onde de choc dans les parois du tube*. Les caractères de ce phénomène dépendent bien moins de l'explosif que du verre. La durée du passage de l'onde en un point est de l'ordre de 1/100.000 de seconde. Sa vitesse, constante sur une assez grande distance et voisine de la vitesse du son dans le verre, est 5.800 m/sec. pour du cristal de 0 mm. 5 d'épaisseur, et 6700 m/sec. pour du verre vert de 3 mm. d'épaisseur. *Cette onde modifie le verre d'une façon permanente, elle le rend partiellement, ou même parfois complètement opaque*. Dès le passage de l'onde de choc, l'extrémité du tube de verre est projetée en avant par tranches séparées. Nous avons étudié ce phénomène. En faisant détoner un explosif dans un tube en acétate de cellulose rempli d'eau distillée, nous avons enregistré photographiquement la propagation d'une onde dans l'acétate de cellulose. La vitesse de cette onde est voisine de 2.000 m/sec.

Nous avons ensuite étudié les phénomènes provoqués dans l'air par la détonation d'un explosif solide. *Nous avons montré qu'il se propage dans l'air une onde de choc non lumineuse, en même temps que des gaz lumineux sont lancés en avant*. La vitesse de ces deux phénomènes est la même sur un parcours de quelques décimètres. Comme ils prennent naissance au même instant, *leurs fronts coïncident pendant un certain temps*. Ensuite, la vitesse des gaz s'amortissant plus vite que celle de l'onde de choc, *cette dernière précède les gaz*. Nous avons mesuré pour divers explosifs la distance au bout de laquelle l'onde de choc se sépare des gaz lumineux, ainsi que les vitesses de ces deux phénomènes à différentes distances de la colonne d'explosif. L'influence de la densité de chargement, du diamètre du tube de verre et de la longueur de la colonne d'explosif a été examinée. Nous avons montré en particulier que la vitesse initiale de l'onde de choc et des gaz lumineux est (sauf pour de très faibles valeurs de la densité de chargement), *à peu près indépendante des conditions expérimentales*. Cette vitesse, voisine de 6.200 m/sec. est donc une *vitesse limite*.

LA TRANSMISSION DE LA DÉTONATION A DISTANCE

A. — Mécanisme de la transmission dans l'air

On sait, depuis fort longtemps, que l'on peut provoquer la détonation d'un explosif, en faisant détoner, par un moyen quelconque, une autre masse d'explosif (de même nature ou de nature différente), située à une distance plus ou moins grande de la première. Ce phénomène de transmission de la détonation à distance est quelquefois appelé « détonation par influence » ou « explosion sympathique ».

On a fait un assez grand nombre de recherches expérimentales pour préciser dans quelles conditions et jusqu'à quelle distance la détonation peut ainsi se transmettre. Avec un explosif déterminé cette « distance de transmission » dépend entre autres des facteurs suivants : quantité d'explosif, densité de chargement, diamètre de la cartouche, grosseur des grains d'explosif, nature et épaisseur de l'enveloppe, nature des supports sur lesquels elle est placée, nature de la matière remplissant l'intervalle entre la cartouche « excitatrice » et la cartouche « excitée », etc...

Ainsi, d'après les expériences du Capitaine COVILLE, citées par BERTHELOT (1), la distance de transmission D , exprimée en mètres, dans le cas de la dynamite n° 1 (75 % nitroglycérine, 25 % guhr) est la suivante, lorsque les cartouches sont contenues dans des enveloppes métalliques rigides posées sur un sol résistant :

$$D = 3,0 C.$$

C étant le poids de la charge excitatrice en kilogrammes. Si la dynamite contient moins de nitroglycérine, on trouve une distance D plus faible, par exemple :

$$D = 0,90 C.$$

pour une dynamite à 55 % de nitroglycérine.

La distance D est encore diminuée lorsque les enveloppes métalliques sont moins épaisses.

En 1922, AUDIBERT (2) a montré que la distance D pouvait être déterminée expérimentalement avec une erreur de moins de 2 mm.

Diverses théories ont été proposées pour expliquer le mécanisme de cette transmission de la détonation à distance.

Une des premières est celle des *vibrations synchrones*, due à ABEL (3), et d'après laquelle la cause de la détonation par influence résiderait dans le « synchronisme entre les vibrations produites par le corps qui provoque la détonation et celles que produirait en détonant le premier corps : précisément comme une corde de violon résonne à distance à l'unisson avec une autre corde mise en vibration ». Les expériences de CHAMPION et PELLET (4) sur l'iodure d'azote, semblaient, à première vue, apporter une vérification expérimentale à la théorie d'ABEL. Mais BERTHELOT (1) a montré que l'on pouvait très bien les expliquer sans faire appel à cette théorie.

A l'appui de sa théorie, ABEL a cité, d'autre part, les faits suivants : En premier lieu, la détonation d'un explosif ne peut pas être provoquée indifféremment par n'importe quel explosif. Ainsi l'iodure d'azote ne pourrait pas faire détoner le coton-poudre comprimé. Avec le chlorure d'azote, il faut en employer une quantité dix fois supérieure à celle qui est nécessaire dans le cas du fulminate de mercure. De même on ne peut pas faire détoner du coton-poudre en feuilles avec de la nitroglycérine. Mais l'inverse a lieu et ceci est en contradiction avec l'hypothèse des vibrations synchrones.

Cette contradiction et d'autres faits difficilement explicables par la théorie d'ABEL, ont incité BERTHELOT (1) à exécuter des expériences avec des gaz et des liquides instables. Aucune de ces expériences n'a semblé confirmer la théorie des vibrations synchrones.

BERTHELOT a alors pensé que la détonation par influence devait être due à la « transmission d'un choc, résultant des pressions énormes et subites » produites par l'explosif, « choc dont la force vive se transforme en chaleur au sein de la matière explosive », c'est-à-dire que la transmission de la détonation à distance a lieu par l'intermédiaire d'une véritable *onde de choc**. BERTHELOT explique ce phénomène de la manière suivante : « La propagation par l'air ou par les supports se fait uniquement en vertu du dernier choc communiqué par la matière explosive, force vive qui n'est

(*) Berthelot n'a toutefois pas utilisé ce terme, qui n'a été introduit que plus tard dans le langage scientifique.

plus régénérée, et qui s'affaiblit rapidement avec la distance. La matière explosive ne détone pas parce qu'elle transmet le mouvement, mais au contraire parce qu'elle l'arrête, et qu'elle en transforme sur place l'énergie mécanique en énergie calorifique capable d'élever subitement la température de la matière, jusqu'au degré qui en provoque la décomposition ».

Après ceux de BERTHELOT et d'ABEL, il n'a été publié qu'un nombre relativement restreint de travaux relatifs à la détonation par influence. Il faut citer ceux de MUNROÉ (5), DAUTRICHE (6), COMEY (7), AUDIBERT (2), LAFFITTE (8), PERROTT et GAWTHROP (9), STORM (10), BURLOT (11).

La connaissance de ce phénomène présente une importance pratique considérable, aussi ces travaux sont-ils, pour une forte part, l'œuvre de techniciens. Les résultats les plus importants ont été obtenus d'une part par AUDIBERT et d'autre part par BURLOT. Les recherches d'AUDIBERT furent inspirées par le souci de l'utilisation rationnelle des explosifs dans les mines; celles de BURLOT furent entreprises au titre de la commission des substances explosives, et visent surtout « l'application au problème de la sécurité des ateliers, dépôts et parcs de stockage renfermant des substances explosives ».

L'étude expérimentale du mécanisme de la transmission de la détonation par influence a été abordée par deux auteurs: LAFFITTE et BURLOT.

LAFFITTE étudia, par la méthode d'enregistrement photographique, la propagation des phénomènes lumineux dans l'intervalle séparant deux colonnes d'explosif contenues dans un tube de verre. En provoquant la détonation de la première colonne par un détonateur, il n'obtenait la détonation par influence que lorsque l'intervalle entre les deux colonnes était assez faible (inférieur à 20 cm.). Il a montré que la détonation par influence avait lieu au moment même où les phénomènes lumineux provoqués par la détonation de la première colonne atteignaient la seconde.

Des expériences analogues à celles de LAFFITTE ont été réalisées depuis par PERROTT et GAWTHROP (9).

D'un grand nombre d'expériences, faites dans des conditions très diverses, BURLOT a conclu à trois causes possibles de l'excitation à distance:

- 1° Onde de choc;
- 2° Gaz animés d'un mouvement d'ensemble et mouvements moléculaires de ces gaz;
- 3° Projectiles solides.

Ces trois modes de transport de l'énergie pouvant être mis en cause séparément ou par groupes.

Il était intéressant — à la fois aux deux points de vue, théorique et pratique — de préciser quel est, suivant les conditions expérimentales, celui des modes précédents qui provoque la détonation par influence. Ce sont les résultats des recherches entreprises dans ce but qui sont rapportés dans la première partie de ce chapitre. Dans le cas de la transmission de la détonation par projection d'éclats, nous n'avons pu faire que quelques observations, car l'étude systématique n'était pas réalisable au laboratoire. D'ailleurs, d'une façon générale, nous avons dû nous limiter à des expériences mettant en œuvre des quantités d'explosif ne dépassant que rarement 50 grammes.

ETUDE EXPERIMENTALE

La méthode optique décrite au chapitre VI permet une étude analytique des phénomènes provoqués par la détonation des explosifs solides. Nous avons pensé pouvoir utiliser cette méthode, concurremment à la méthode d'enregistrement photographique de MALLARD et LE CHATELIER, pour l'étude du mécanisme de la transmission de la détonation à distance. Les résultats numériques exposés dans la seconde partie du chapitre précédent, nous indiquent, dans des conditions expérimentales bien déterminées, les positions respectives de l'onde de choc et des gaz lumineux à différentes distances de la colonne d'explosif. Ils nous ont servi de point de départ dans ces recherches.

Pour étudier séparément l'action excitatrice de l'onde de choc et celle des gaz lumineux, il est évidemment nécessaire de pouvoir obtenir la détonation par influence de colonnes d'explosif placées à des distances de la colonne excitatrice supérieure à L (L étant la distance au bout de laquelle se séparent l'onde de choc et les gaz lumineux) .

Les deux colonnes d'explosif étant disposées dans un tube de verre et séparées par un intervalle D , nous avons tout d'abord mesuré, dans un grand nombre de circonstances, la valeur D_1 pour laquelle la détonation par influence cesse d'être possible. En employant comme explosif excitateur la dynamite n° 1, le tétryl, l'acide picrique, et comme explosif excité un de ces mêmes produits, nous avons toujours obtenu pour D_1 des valeurs inférieures à L .

Par exemple, en se plaçant dans les conditions indiquées par le tableau I, la détonation ne se transmet pas au delà d'une distance $D_1 = 54$ cm., alors que la distance L correspondant à la séparation de l'onde de choc et des gaz lumineux est voisine de 70 cm.

TABLEAU I

Diamètre du tube.....	16 mm.
Explosif exciteur.....	Colonne de dynamite de 10 cm. Densité de chargement : 1,6.
Explosif excité.....	Colonne de tétyl. Densité de chargement : 0,7.

Deux solutions étaient possibles : diminuer L , ou bien augmenter D_1 .

Nous avons tout d'abord tenté de réduire la distance L en interposant une toile ou une plaque métallique M (fig. 66) sur le trajet de l'onde de choc et des gaz lumineux.

Dans le premier cas (toile métallique), on observe une diminution importante de la distance L . Malheureusement, D_1 se trouve également diminué et reste inférieur à L .



Fig. 66.

Dans le second cas (plaque métallique), les gaz lumineux sont arrêtés par la plaque. La distance D est donc égale à la distance de la colonne excitatrice à l'écran. Ce procédé ne nous a cependant pas permis, pour les raisons suivantes, d'étudier la transmission, par l'onde de choc, de la détonation par influence.

1° Si la plaque est épaisse (supérieure à 1 mm.), l'onde de choc sort du métal trop affaiblie pour que l'on puisse enregistrer photographiquement sa propagation au delà de la plaque.

2° Si la plaque est mince (inférieure à 1 mm.), l'enregistrement photographique de la propagation de l'onde de choc au delà de la plaque est possible, mais une nouvelle difficulté se présente. Les éclats provenant de la rupture de la plaque rejoignent rapidement l'onde de choc. Il en résulte une confusion qui rend les photographies inutilisables. (voir figure 54).

Pour obtenir des valeurs de D supérieures à L , nous avons alors songé à utiliser, comme explosif excité, le *fulminate de mercure*. Nous allons maintenant rapporter les expériences exécutées dans ces conditions.

Nous avons utilisé les méthodes d'enregistrement photographiques précédemment décrites.

a) Procédé de MALLARD et LE CHATELIER (phénomènes lumineux seulement).

b) Méthode optique décrite au chapitre VI (ondes de choc, phénomènes lumineux, éclats).

I. — Dans les expériences faites avec le dispositif simple (a), l'explosif exciteur forme une colonne E (fig. 67), de 6 à 10 cm. de longueur, au début d'un tube de verre *t*. Un détonateur *d* est fixé à l'aide d'un bouchon de liège B₁ dans l'axe du tube, l'extrémité fermée étant en contact avec le début de la colonne E. Le tube *t* est fermé à son autre extrémité par un second bouchon de liège B₂, percé en son centre d'un trou dans lequel entre avec frottement un autre tube de verre *t'*. Ce dernier contient, sur une certaine longueur, une colonne de fulminate de mercure. Du côté de la colonne E, le tube *t'* arrive juste à l'extrémité du bouchon B₂. La distance entre les deux colonnes d'explosif est la distance D, mesurée entre l'extré-

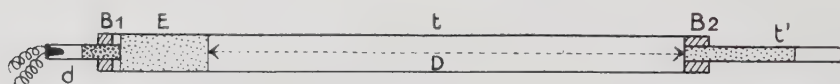


Fig. 67.

mité de la colonne E et le bouchon B₂. Le diamètre de la seconde colonne (diamètre intérieur du tube *t'*) n'intervient pas, car il s'agit simplement de constater si l'explosif excité a détoné ou non.

Ces expériences ont été faites dans les conditions expérimentales indiquées par le tableau II.

TABLEAU II

Diamètre intérieur du tube... 16 mm.

Explosif exciteur..... Colonne de dynamite n° 1, de
6 à 10 cm. de longueur.
Densité de chargement : 1,6.

Explosif excité..... Colonne de fulminate de mer-
cure.
Densité de chargement : 1.

Nous avons constaté que, dans ces conditions, la distance maximum D₁, pour laquelle la détonation se transmet de la dynamite au fulminate, est supérieure à 150 cm. La distance L étant voisine de 70 cm, il est possible

d'étudier au-delà du point de séparation le mécanisme de la transmission de la détonation à distance.

Les résultats obtenus indiquent un mécanisme différent suivant la grandeur de la distance D séparant les deux colonnes d'explosif.

1° D est inférieur à 70 cm. — L'onde de choc et les gaz lumineux ne sont pas encore séparés. Les photographies obtenues sont alors tout à fait analogues à celles publiées par LAFFITTE. *Le fulminate de mercure détone dès que le front commun à l'onde de choc et aux gaz parvient en son contact.*

La photographie reproduite par la figure 68 correspond à $D = 43$ cm. La détonation de la colonne de dynamite a eu lieu en dehors du champ de l'objectif et son image serait sur la gauche de la photographie. En A B, on voit l'image des gaz lumineux lancés en avant par la détonation de la dynamite. En B, ces gaz lumineux sont arrivés au contact de la colonne de fulminate de mercure. Ils ont produit immédiatement la détonation franche de celui-ci. B C est l'image de la détonation du fulminate et C D l'image des gaz lumineux lancés en avant à la suite de cette détonation.

Comme nous l'avons déjà suggéré au cours du chapitre précédent, on peut très bien assimiler la propagation simultanée de l'onde de choc et des gaz lumineux à celle d'une véritable onde explosive. *Quand D est plus petit que L , l'amorçage par influence présente donc une grande analogie avec l'amorçage direct.* L'onde de choc et les gaz lumineux s'altèrent d'une façon continue; le pouvoir excitateur correspondant à l'ensemble de ces deux phénomènes est donc d'autant plus faible que D est plus grand. Pour une valeur de D inférieure à L , le pouvoir excitateur devient insuffisant pour amorcer un explosif autre qu'un explosif d'amorçage.

2° D est compris entre 70 et 115 cm. — L'onde de choc et les gaz lumineux sont séparés. L'onde de choc, invisible sur les photographies, précède alors les gaz lumineux. On constate que la détonation du fulminate de mercure a lieu avant l'arrivée des gaz lumineux; *c'est l'onde de choc qui transmet la détonation.*

La photographie représentée sur la figure 69 correspond à $D = 108$ cm. La détonation de la colonne excitatrice a eu lieu bien en dehors du champ de l'objectif. Son image serait sur la gauche de la photographie, à une distance d'environ 8 cm. On voit en E une partie de l'image des gaz lumineux projetés en avant par la détonation de la dynamite, le fulminate de mercure a détoné en B, 1/7000 de seconde environ avant que les gaz lumineux y soient parvenus. Cela correspond au moment où l'onde de choc est arrivée au contact de la première tranche de fulminate. La tache noire partant de B, et inclinée vers la gauche, est l'image des gaz

lumineux lancés en arrière par la détonation du fulminate. C D correspond à ceux lancés en avant.

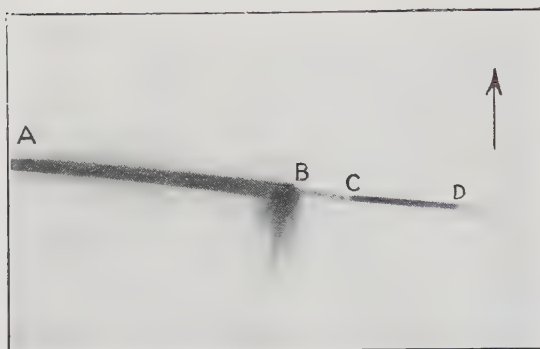


Fig. 68. — Détonation par influence d'une colonne de fulminate de mercure sous l'action conjuguée de l'onde de choc et des gaz lumineux.

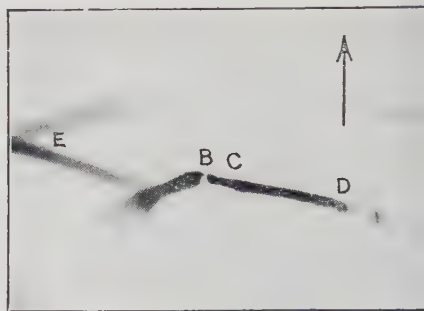


Fig. 69. — Détonation par influence d'une colonne de fulminate de mercure sous l'action de l'onde de choc précédant les gaz lumineux.

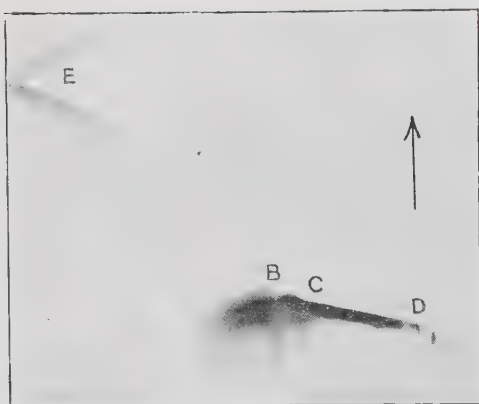


Fig. 70. — Détonation par influence d'une colonne de fulminate, sous l'action des gaz lumineux, après le passage de l'onde de choc.

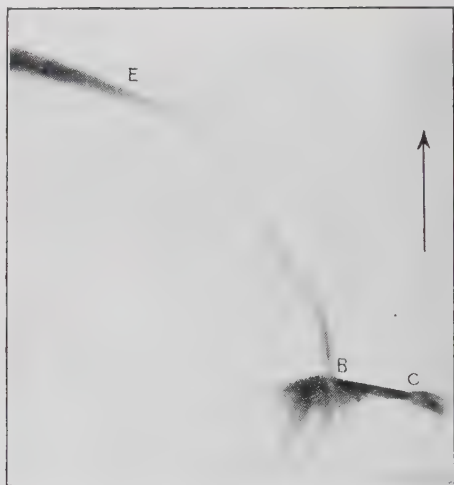


Fig. 71. — Détonation par influence d'une colonne de fulminate, sous l'action des gaz lumineux, après le passage de l'onde de choc.

La théorie de Berthelot, que nous avons exposée au début de ce chapitre, s'applique à ce mode de transmission de la détonation par influence.

3° D est supérieur à 115 cm. — L'onde de choc est trop amortie pour provoquer la détonation par influence du fulminate. A 115 cm de la colonne excitatrice, les gaz lancés en avant par l'explosion de la dynamite, ne sont plus, en général, suffisamment lumineux pour pouvoir être enregistrés photographiquement. Leur vitesse de propagation décroît très rapidement pour devenir de l'ordre de quelques dizaines de mètres par seconde à 140 cm. de l'explosif exciteur. *Ils arrivent au contact du fulminate de mercure longtemps après l'onde de choc, mais encore suffisamment chauds pour amorcer la détonation de cet explosif.*

Les photographies obtenues dans ces conditions montrent que l'onde explosive ne prend pas immédiatement naissance dans le fulminate. L'élévation de température due aux gaz chauds produit une combustion, se transformant d'ailleurs très rapidement en une détonation. On remarque, en effet, à l'endroit correspondant au début de la colonne de fulminate, au lieu du trait noir caractéristique de l'onde explosive, une plage lumineuse confuse. Ce résultat est d'ailleurs tout à fait conforme à ceux exposés au chapitre III.

La disposition de notre laboratoire ne nous a pas permis de faire des expériences pour des valeurs de D supérieures à 150 cm. A cette distance, les gaz chauds produisent encore l'explosion du fulminate. Nous n'avons donc pas déterminé la distance maximum D, de transmission.

Nous avons fait un assez grand nombre d'expériences pour vérifier que dans le cas où $D > 115$ cm. la détonation du fulminate est toujours due aux gaz chauds.

Les faits suivants ne laissent subsister aucun doute à ce sujet.

1° Sur quelques photographies (*fig 71*) les gaz chauds ont été suffisamment photogéniques pour impressionner le papier sensible jusqu'à leur arrivée au contact du fulminate. Ces gaz sont bien, dans ce cas, la cause de la détonation par influence.

2° L'intervalle de temps compris entre l'arrivée de l'onde de choc au contact du fulminate et la détonation de celui-ci dépasse dans certains cas 1/200 de seconde.

3° Il ne peut s'agir d'une transmission par les supports. Si le tube est bourré de liège au-delà de la colonne de dynamite, la détonation du fulminate n'a plus lieu. D'autre part, nous avons vérifié directement que l'onde dans les parois du tube de verre est incapable, dans ces conditions, de produire la détonation de la colonne de fulminate.

La photographie reproduite par la *figure 70* correspond à $D = 130$ cm. La détonation de la dynamite a eu lieu bien en dehors du champ de

l'appareil photographique. L'image de cette détonation serait sur la gauche de la photographie, à une dizaine de centimètres environ. L'intervalle de temps séparant la détonation du fulminate de celle de la dynamite est considérable. La détonation par influence a eu lieu en B lorsque les gaz chauds, qui cessent d'impressionner le papier sensible à partir de E, sont arrivés au contact de la première tranche de fulminate. L'image B C de l'explosion du fulminate est confuse. La plage lumineuse indique une déflagration.

La photographie représentée par la *figure 71* correspond à $D = 140$ centimètres. Les gaz chauds ont impressionné le papier sensible jusqu'à leur contact avec le fulminate en B; ils ont alors provoqué la détonation de cet explosif. On remarquera sur cette photographie la diminution rapide de la vitesse de ces gaz. En B, cette vitesse est de l'ordre d'une dizaine de mètres par seconde seulement.

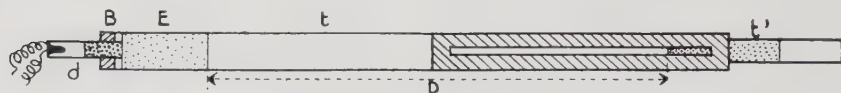


Fig. 72.

II. Pour confirmer et étendre les résultats précédents, nous avons repris ces recherches en utilisant la méthode d'enregistrement photographique avec éclairage supplémentaire décrite au chapitre VI.

Dans le tube métallique à fentes, nous avons introduit par l'extrémité libre, et sur une longueur de quelques centimètres, un tube de verre t' contenant du fulminate de mercure (*fig. 72*). Le diamètre extérieur de ce tube t' est à peine inférieur au diamètre intérieur du tube métallique.

Cette étude a confirmé tous les résultats obtenus par la méthode de MALLARD et LE CHATELIER. Elle nous a de plus donné quelques renseignements complémentaires.

1° Dans le cas où D est plus grand que la distance L , au bout de laquelle l'onde de choc et les gaz lumineux se séparent, l'onde de choc seule produit, dans un certain intervalle, la détonation par influence du fulminate de mercure. Par suite des fentes du tube métallique, cet intervalle se trouve d'ailleurs considérablement réduit. Sur les photographies, on voit que la détonation par influence a lieu dès que l'onde de choc arrive au contact de la première tranche de fulminate. Notre dispositif nous permettant d'apprécier le $1/100.000$ de seconde, on peut affirmer que le retard d'excitation est, dans ce cas, tout à fait négligeable.

2° Quand la distance D, comprise entre les deux colonnes d'explosif, n'est que très légèrement supérieure à celle correspondant à la détonation par onde de choc, on obtient des photographies présentant un aspect particulier. L'onde de choc semble provoquer l'explosion des toutes premières tranches de la colonne de fulminate, sans que cette explosion

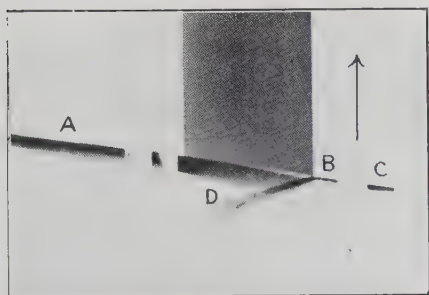


Fig. 73. — Détonation par influence d'une colonne de fulminate (par l'onde de choc).

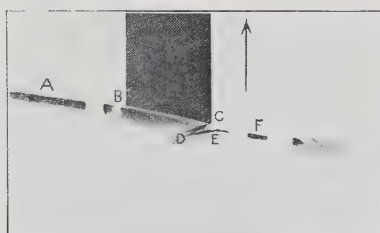


Fig. 74. — Détonation par influence d'une colonne de fulminate (par les gaz lumineux).

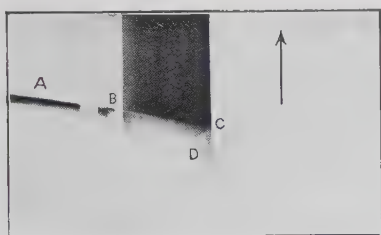


Fig. 75. — Réflexion de l'onde de choc.

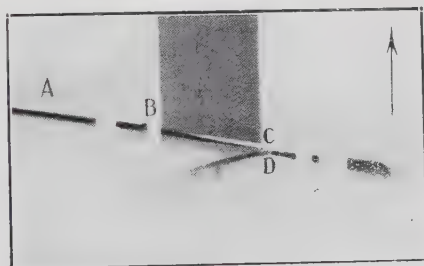


Fig. 76. — Détonation par influence d'une colonne de fulminate (par les gaz lumineux).

se transmette à toute la masse d'explosif. Sur les photographies, cette explosion partielle du fulminate est visible, grâce aux flammes qu'elle projette en arrière de l'explosif. La détonation complète du fulminate a lieu dès que les gaz chauds arrivent à son contact.

Les photographies représentées par les figures 73, 74, 75, 76, 77, correspondent à cette étude. Les conditions expérimentales sont données par le tableau III. (Notons que les dimensions du tréteau d'explosion interdisaient l'emploi d'une colonne excitatrice de grande puissance.)

TABLEAU III

Diamètre intérieur du tube de verre	16 mm.
Diamètre extérieur du tube métallique	15 mm.
Explosif exciteur.....	Colonne de tétryl de 10 cm de longueur. Densité de chargement : 0.65.
Explosif excité.....	Colonne de fulminate de mercure. • Densité de chargement : 1.

Dans ces conditions, la séparation de l'onde de choc et des gaz lumineux a lieu à 55 cm. de la fin de la colonne de tétryl. La détonation de la colonne excitatrice s'est toujours produite en dehors du champ de l'appareil photographique. L'image de cette détonation serait sur la gauche des photographies.

Fig. 73. Le tube à fentes étant disposé à 45 cm. de la fin de la colonne de tétryl, la distance D correspondante est de 60 cm. On voit, en A, l'image des gaz lumineux produits par la détonation du tétryl. L'onde de choc a amorcé la détonation du fulminate en B, avant l'arrivée des gaz lumineux. En B C, on voit l'image des gaz projetés en avant par la détonation de la dernière tranche de fulminate, et en B D l'image de ceux projetés en arrière par la détonation de la première.

On observe, sur cette photographie et sur les suivantes, plusieurs interruptions de l'image des gaz lumineux; elles sont dues, soit aux extrémités du tube à fentes, soit aux montants du tréteau d'explosion.

Figure 74. Le tube à fentes étant disposé à 60 cm. de la colonne excitatrice, la distance D est alors égale à 75 cm. L'onde de choc est arrivée au contact de la première tranche de fulminate en C. Elle a produit une explosion partielle de cet explosif, visible sur la photographie grâce aux phénomènes lumineux C D.

Les gaz lumineux A B sont arrivés au contact de la colonne de fulminate en D; ils ont alors provoqué la détonation complète de cet explosif. En F, on voit les gaz lumineux lancés en avant, en E D, ceux lancés en arrière, à la suite de la détonation du fulminate de mercure.

Figure 75. Pour vérifier que sur la photographie représentée par la *figure 74* les phénomènes lumineux C D sont bien dus au fulminate de

mercure et non à une réflexion de l'onde de choc sur le fulminate, nous avons remplacé cet explosif par du sable. En C, l'onde de choc arrive au contact du sable. Elle se réfléchit en C D. La vitesse de l'onde réfléchie est faible et rapidement décroissante. L'image de cette réflexion ne présente aucune ressemblance avec l'image C D observée sur la *figure 74*.

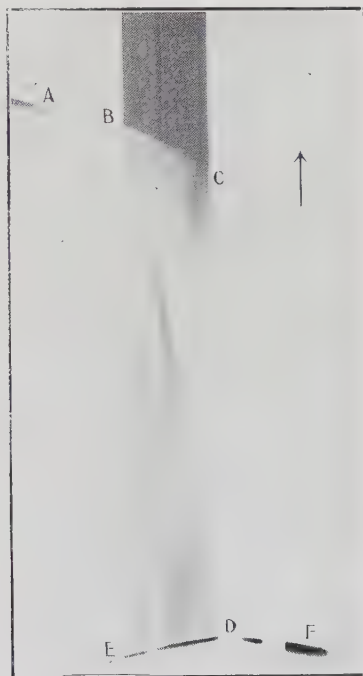


Fig. 77. — Détonation par influence d'une colonne de fulminate de mercure (par les gaz chauds).

Il faut donc admettre que, dans ce dernier cas, C D était produit par une explosion partielle du fulminate.

Figure 76. Le tube à fentes étant disposé à 65 cm. de la colonne excitatrice, la distance D est alors égale à 80 cm. L'onde de choc arrive en C au contact de la colonne de fulminate de mercure. Elle est alors trop affaiblie pour en provoquer l'explosion. Ce sont les gaz lumineux, arrivant après l'onde de choc, qui provoquent en D la détonation du fulminate. Sur la photographie, on voit l'image de la détonation du fulminate et celle des gaz lumineux lancés en avant et en arrière par cette détonation.

Figure 77. Le tube à fentes étant disposé à 95 cm. de la colonne excitatrice, la distance D est alors égale à 110 cm. On voit en A la fin de l'image des gaz lumineux. L'onde de choc B C est arrivée en C au contact de la colonne de fulminate. Elle est évidemment bien trop affaiblie pour en provoquer l'explosion. La détonation par influence a eu lieu en D un temps très notable ($1/400$ de seconde environ) après l'arrivée de l'onde de choc en C. Comme nous l'avons montré précédemment, ce sont les gaz chauds qui ont provoqué cette détonation. On voit en D, F, E l'image de la détonation de fulminate et celles des gaz lumineux projetés en avant et en arrière par cette détonation. Sur cette photographie, on n'observe pas la réflexion en C de l'onde de choc. Avec notre dispositif, la distance D était trop grande pour que l'on puisse enregistrer la propagation d'un aussi faible ébranlement.

DETONATION PAR INFLUENCE EN ARRIERE DE LA COLONNE EXCITATRICE

Toutes les expériences que nous venons de décrire se rapportent à la transmission de la détonation par influence dans une direction tout à fait privilégiée à cet égard; la direction de propagation de l'onde explosive dans la colonne excitatrice. Dans le cas général, la détonation par influence peut évidemment se transmettre dans toutes les directions. Si on opère, comme précédemment, dans des tubes de verre, il n'y a cependant que deux directions possibles : la direction de propagation de l'onde explosive et la direction inverse.

Avec notre dispositif optique, nous avons pu, en éclairant en deçà de la colonne excitatrice, vérifier qu'il se propage, dans la direction opposée à celle de l'onde explosive, une onde de choc et des gaz lumineux. Ces phénomènes sont produits par la détonation de la première tranche d'explosif, comme ceux étudiés précédemment le sont par la détonation de la dernière. Dans le voisinage de l'explosif, le front de l'onde de choc et celui des gaz lumineux coïncident et leurs vitesses sont identiques. La vitesse des gaz s'amortit plus rapidement que celle de l'onde de choc aussi, à une distance L' de l'explosif, les deux phénomènes se séparent et continuent de se propager à des vitesses différentes. Les vitesses des gaz et de l'onde de choc, la distance L' , ont des valeurs considérablement plus faibles que celles correspondant aux phénomènes analogues provoqués par la détonation de la dernière tranche d'explosif. En ce qui concerne

l'action à distance, la détonation de la première tranche d'explosif est moins importante que la détonation de la dernière tranche, mais doit néanmoins être prise en considération.

Pour cette étude nous avons simplement utilisé la méthode d'enregistrement photographique de MALLARD et LE CHATELIER. La figure 78 indique la disposition des deux colonnes d'explosif.

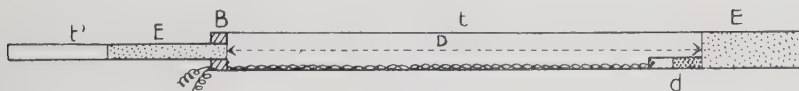


Fig. 78.

- E — colonne excitatrice.
- d — détonateur au fulminate.
- E' — colonne excitée.
- B — bouchon de liège.

Le tube de verre contenant la colonne excitatrice (tétryl, densité de chargement 0,9) a 16 mm. de diamètre intérieur.

D désignant la distance comprise entre les deux colonnes d'explosif voici les résultats obtenus :

1° L'explosif étant le tétryl, même très peu comprimé (densité de chargement 0,6), pour toutes les valeurs de D compatibles avec le dispositif

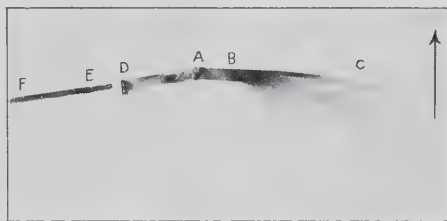


Fig. 79. — Détonation par influence d'une colonne de fulminate de mercure (par action conjuguée de l'onde de choc et des gaz lumineux projetés en arrière par la détonation de la première tranche de l'explosif excitateur).

expérimental ($D > 6$ cm.) il est impossible d'obtenir la détonation par influence.

2° L'explosif excité étant le fulminate de mercure (densité de chargement 1) on obtient la transmission de la détonation même pour $D > 20$ cm.

La photographie représentée par la *figure 79* a été obtenue dans ces conditions pour $D = 14$ cm.

Le tétryl a détoné en A B. On voit en B C les gaz lumineux lancés en avant et en A D les gaz lumineux lancés en arrière à la suite de cette détonation.

Dès l'arrivée des gaz lumineux en D, le fulminate a détoné. On voit en D E l'image de la détonation de cet explosif et en E F l'image des gaz lumineux projetés en avant par cette détonation. L'intervalle opaque D est du au bouchon de liège.

TRANSMISSION DE LA DETONATION A DISTANCE PAR ECLATS

On sait que si un projectile quelconque se déplaçant à une vitesse V rencontre une masse d'explosif il provoque la détonation de cet explosif si sa vitesse V est supérieure à une certaine valeur V_0 qui dépend d'un grand nombre de facteurs liés à l'explosif et au projectile.

Nous avons signalé que la méthode optique exposée au chapitre VI, permet l'enregistrement photographique des trajectoires décrites par les projectiles et en particulier par les éclats de détonateur. Nous avons pensé que des photographies reproduisant la trajectoire de l'éclat et la détonation de l'explosif donneraient quelques renseignements sur ce mode de transmission — déjà connu — de la détonation par influence.

Pour que le déplacement d'un éclat puisse être enregistré photographiquement il faut que cet éclat soit assez gros et en tout cas que sa trajectoire soit dans le plan des fentes du tube métallique. Comme la vitesse des éclats du détonateur est toujours considérable c'est l'arrivée du premier éclat qui provoque la détonation du fulminate de mercure (utilisé comme explosif excité).

Souvent la trajectoire de cet éclat est invisible sur la photographie et la détonation du fulminate a lieu avant l'arrivée des éclats visibles. Quelquefois cependant la trajectoire du premier éclat est dans le plan des fentes. Dans ce cas on voit une ligne blanche — trajectoire de l'éclat — extrêmement fine, mais très nette (Malheureusement presque invisible sur les reproductions de nos photographies originales). Cette ligne s'arrête à l'endroit précis où commence la détonation du fulminate, dont la détonation a par conséquent été amorcée par le choc de l'éclat du détonateur.

B) Établissement du régime de la détonation dans l'explosif excité par influence

Quand on fait varier la distance D entre l'explosif excitateur et l'explosif excité, les caractères de l'explosion par influence peuvent être modifiés. BERTHELOT (I) considérait d'ailleurs la possibilité de ces modifications comme une conséquence directe de sa théorie. Dans certains cas BURLOT (II) au moyen des empreintes laissées sur les supports en plomb des cartouches excitatrices et excitées, a montré que la cartouche excitée ne prenait pas dès le début un régime de détonation franche. Ces phénomènes n'ont cependant jamais été l'objet de recherches systématiques.

La méthode d'enregistrement chrono-photographique est évidemment tout à fait désignée pour l'étude précise de ces phénomènes.

Déjà au cours de ce chapitre nous avons signalé que le fulminate de mercure sous l'action des gaz chauds projetés en avant par la détonation de la dynamite semblait prendre au début, le régime de la déflagration et non

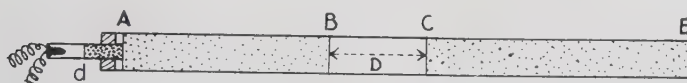


Fig. 80.

celui de la détonation franche. Dans ce cas particulier, le fulminate étant disposé dans un tube de verre, le passage du régime de la déflagration à celui de la détonation était trop rapide pour pouvoir être étudié (Voir chapitre III).

Nous avons pu au contraire, dans un cas particulier où l'explosif excité par influence était, non le fulminate mais l'acide picrique, étudier aisément des phénomènes analogues.

L'explosif excitateur (colonne A B) et l'explosif excité (colonne C E) étaient disposés dans un même tube de verre de la manière indiquée par la figure 80. La détonation de la colonne A B était provoquée par une amorce de fulminate (Igr. 5). L'explosif utilisé (le même pour les deux colonnes) était l'acide picrique cristallisé (densité de chargement 0,9). Cet acide picrique laissé à l'air pendant plusieurs semaines était par suite légèrement humide. Le tube de verre avait 7 mm. de diamètre intérieur. Dans ces conditions la détonation de la colonne A B ne provoque la détonation par influence de la colonne C E que pour des valeurs de la distance D (B C) bien inférieure à L. C'est donc l'action combinée de l'onde de

choc et des gaz lumineux, dus à la détonation de la colonne A B, qui a provoqué dans toutes ces expériences la détonation de la colonne C E.

Même pour des valeurs de la distance D inférieures à 1 cm. le régime normal de la détonation ne s'établit pas immédiatement dans la colonne C E. On observe toujours une période préalable pendant laquelle la vitesse de propagation du phénomène explosif est inférieure à la vitesse normale de détonation de l'acide picrique dans les conditions de l'expérience. Cette vitesse normale de détonation, indépendante de l'amorçage, est déterminée par la détonation de la colonne excitatrice A B.

Quand D est inférieure à 3 cm la vitesse de propagation de l'explosion va en croissant et l'on atteint, si la longueur de la colonne C E est suffisante, le régime normal de la détonation. Ce régime s'établit d'ailleurs d'autant plus rapidement que la distance D est plus faible.

Quand D est compris entre 4 et 6 cm. la vitesse de propagation de l'explosion va au contraire en diminuant puis s'annule. La fin de la colonne d'acide picrique est projetée sans explosion.

Quand D est supérieur à 6 cm. la détonation par influence ne se transmet plus. L'acide picrique de la colonne C E est entièrement projeté sans explosion.

La figure 81 reproduit 4 photographies obtenues dans ces conditions expérimentales et correspondant à différentes valeurs de la distance D. La vitesse normale de détonation de l'acide picrique, mesurée d'après la détonation de la première colonne, est environ 3500 m/sec. Sur ces photographies, l'image de la détonation de la colonne excitatrice est à droite. Grâce à une bande de papier opaque collée sur le tube de verre, la fin de cette colonne est repérée en A. Le sens de déplacement du film est toujours de bas en haut.

I. — $D = 0,7$ cm. Longueur de la colonne excitatrice : 14 cm.

Longueur de la colonne excitée : 29 cm.

Le régime normal de la détonation s'établit rapidement dans l'explosif excité par influence. A 2 cm. du début de la colonne la vitesse de propagation de l'explosion a atteint la vitesse normale de détonation (3500 m/sec.). La vitesse moyenne d'explosion mesurée sur les deux premiers cm. est égale à 2400 m/sec.

Il faut remarquer que l'explosion est moins lumineuse que la détonation franche.

II. — $D = 2,3$ cm. Longueur de la colonne excitatrice : 14 cm.

Longueur de la colonne excitée : 36,5 cm.

La vitesse de propagation du phénomène explosif dans la colonne excitée

par influence est sensiblement constante le long des 13 premiers centimètres et égale à 2200 m/sec. Elle décroît ensuite entre 13 et 18 cm. (moyenne 1500 m/sec.) puis croît rapidement pour atteindre 3 cm. plus loin la vitesse normale de détonation (3500 m/sec.). Le régime normal de détonation s'est donc établi 21 cm. seulement après le début de la colonne excitée.

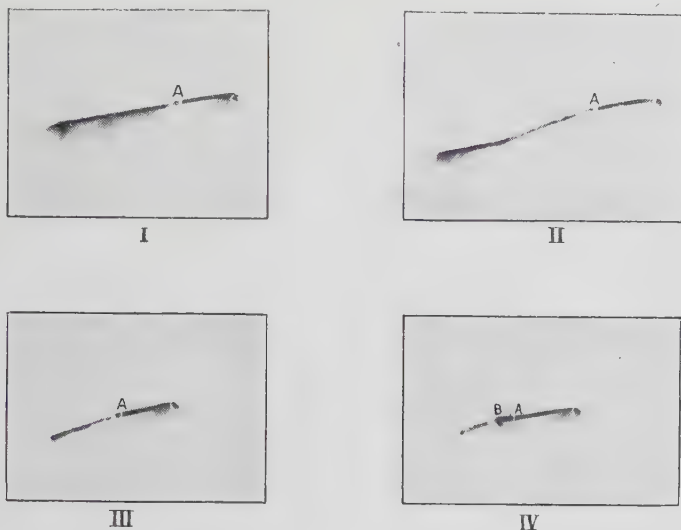


Fig. 81. — Détonation par influence d'une colonne d'acide picrique pour différentes valeurs de D.



Fig. 82. — Détonation par influence d'une colonne de dynamite.

III. — $D = 2,5$ cm. Longueur de la colonne excitatrice: 13 cm.

Longueur de la colonne excitée : 17 cm.

L'explosion se propage dans la seconde colonne à une vitesse à peu près constante et voisine de 2200 m/sec. La longueur de cette colonne n'était pas suffisante pour que l'onde explosive prenne naissance.

IV. — $D = 4$ cm. Longueur de la colonne excitatrice : 15 cm.

Longueur de la colonne excitée : 15 cm.

Une seconde bande de papier opaque collée sur le tube de verre permet de repérer en B le début de la colonne excitée. Une explosion s'est propagée dans cette colonne d'explosif mais sur une longueur de 10 cm. seulement. La vitesse de cette explosion est au début égale à 2150 m/sec.; elle diminue rapidement pour atteindre 1300 m/sec. le long des derniers centimètres de son parcours.

En quoi consiste cette période de décomposition rapide qui précède l'établissement du régime de la détonation normale ?

Il est impossible d'assimiler à une déflagration une décomposition se propageant à une vitesse supérieure à 1000 m/sec.. *Il s'agit donc d'un régime intermédiaire entre la déflagration franche et la détonation franche.* L'étude

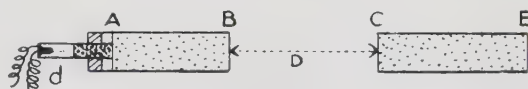


Fig. 83.

de ces régimes intermédiaires est extrêmement peu avancée. Nous avons donc qualifié ce régime en utilisant le terme explosion.

Les phénomènes que nous venons de décrire dans le cas de l'acide picrique ne sont pas particuliers à cet explosif. Nous avons, en effet, observé des phénomènes analogues en utilisant la dynamite n° 1 comme explosif excité.

La comparaison des photographies I et II reproduites par la figure 82 permet de s'en rendre compte.

I. — La colonne excitatrice A B (Tétryl; densité de chargement $\Delta = 0,85$) et la colonne excitée C E (dynamite n° 1; $\Delta = 1$) étaient disposées

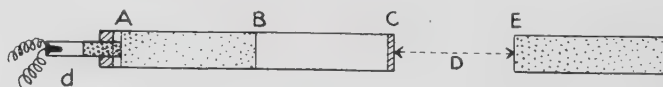


Fig. 84.

de la façon indiquée par la figure 83 dans des tubes de verre de 16 mm. de diamètre intérieur placés dans le prolongement l'un de l'autre.

La détonation par influence se transmet dans ces conditions pour les valeurs de D (B C) inférieures à 21 cm. Cette photographie correspond à $D = 10$ cm. L'établissement du régime de la détonation dans la colonne

excitée C E à lieu rapidement. L'image de la détonation de cette colonne est très nette.

II. — La colonne excitatrice A B (Tétryl; $\Delta = 0,85$) et la colonne excitée E (dynamite n° 1; $\Delta = 1$) étaient disposées de la façon indiquée par la *figure 84*, dans deux tubes de verre de 16 mm. de diamètre, placés dans le prolongement l'un de l'autre.

Le tube de verre A C avait 18 cm. de longueur et la colonne excitatrice A B 6 cm. seulement. Ce tube de verre était fermé à son extrémité C par une rondelle de verre collée avec du Baume de Canada. Dans cette expérience, la distance D (C E) entre les deux tubes étant égale à 10 cm., la transmission de la détonation par influence s'est produite.

L'image de l'explosion de la colonne de dynamite est tout à fait différente de celle que l'on observe sur le cliché I. Elle est extrêmement peu lumineuse et seuls les gaz lumineux projetés en avant par cette explosion sont nettement visibles sur cette photographie. La position de l'image de ces gaz lumineux et la situation du point D (point où les phénomènes lumineux provoqués par la détonation du tétryl arrivent au contact de la dynamite) montrent que la propagation du phénomène explosif dans la dynamite a lieu à une vitesse relativement faible, environ trois fois moins grande que la vitesse de détonation normale.

C) Transmission de la détonation par influence à travers les milieux solides

La détonation d'un explosif solide produit dans tous les milieux environnants des ondes de choc. La vitesse de propagation de ces ondes est décroissante depuis l'origine et tend, plus ou moins rapidement, vers une limite inférieure qui est la vitesse du son dans le milieu de propagation. Au voisinage de l'explosif on sait d'ailleurs que cette vitesse peut être considérablement plus grande que la vitesse du son.

Ces ondes sont toutes susceptibles de provoquer la détonation par influence mais leur rayon d'action varie considérablement avec le milieu de propagation. La distance maxima à laquelle la détonation par influence se transmet est, toutes conditions étant égales par ailleurs, d'autant plus grande que le coefficient de compressibilité du milieu de propagation est plus grand (BURLOT) (11).

Nous avons étudié précédemment la propagation des ondes de choc dans différents milieux transparents (air, verre) et nous avons appliqué les résultats obtenus à l'étude du mécanisme de la transmission de la détonation par influence à travers l'air. Malheureusement la méthode optique utilisée

n'est applicable qu'aux milieux transparents. Si on veut étudier la transmission de la détonation par influence à travers les milieux opaques, il nous faut renoncer à connaître d'une façon précise les caractères de la propagation de l'onde de choc. Dans ces conditions les résultats seront moins nets que ceux obtenus dans le cas de la transmission par l'air. BURLLOT (11) a déterminé dans des conditions bien définies les distances maxima de transmission à travers l'acier, le bois, l'eau et, considérant les retards d'excitation du fulminate de mercure nu comme négligeables, a mesuré également les vitesses moyennes des ondes de choc entre la cartouche excitatrice et la cartouche excitée. En disposant les cartouches sur des plaques supports en plomb il a pu distinguer les détonation franches des déflagrations. Cette méthode ne donne cependant que peu de renseignements sur les caractères de l'explosion dans la cartouche excitée. A cet égard, la méthode d'enregistrement photographique est au contraire tout à fait indiquée. Il nous a paru intéressant de reprendre par cette dernière méthode les expériences de BURLLOT.

Dans nos recherches les éclats métalliques produisant d'importants dégâts dans notre laboratoire nous avons utilisé, comme milieu de propagation, à peu près exclusivement le bois de sapin.

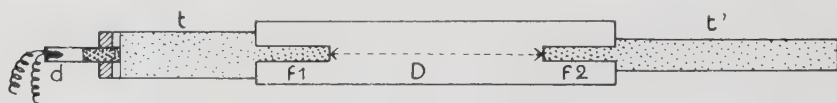


Fig. 85.

En nous plaçant dans des conditions très favorables (Dynamite à la densité de chargement 1,65 comme *explosif excitateur*; Fulminate de mercure à la densité de chargement 1,25 comme *explosif excité*), la détonation ne se transmet pas à travers des épaisseurs de bois supérieures à 3 cm 15. Il est vrai que dans ces expériences il nous était impossible de « canaliser » l'énergie comme nous avons pu le faire lors de l'étude de la transmission à travers l'air en utilisant un unique tube de verre. Voici d'ailleurs le dispositif expérimental utilisé :

Dans un cylindre en bois de sapin de 25 mm. de diamètre (fig. 85) on creuse aux deux extrémités un trou cylindrique de 15 mm. de profondeur. L'une de ces cavités a 17,5 de diamètre, l'autre 9,5 mm. seulement. Leur fond est bien plan et perpendiculaire à l'axe du cylindre. On ménage deux fentes f_1 et f_2 . Chacune de ces fentes va d'une extrémité du cylindre au fond de la cavité correspondante. Elles sont sur la même génératrice. Leur largeur est de 2 mm. On enfonce dans la grande cavité un tube de verre t

de 17 mm. de diamètre extérieur et de 15 mm. de diamètre intérieur. Ce tube, long de 10 cm., a été préalablement rempli de dynamite. Dans l'autre cavité, on enfonce un tube t' de 9 mm. de diamètre extérieur, destiné à contenir le fulminate de mercure. (Le fulminate est introduit dans le tube t' au moment de l'expérience.)

Après s'être assuré que l'extrémité de chaque tube est en contact avec le fond de la cavité correspondante, on fixe les tubes à l'appareil à l'aide de cire Golaz.

On photographie par la méthode habituelle les phénomènes provoqués par la détonation de la dynamite. En disposant convenablement les fenêtres on obtient un enregistrement complet des deux explosions.

Résultats des expériences. — Tous les cylindres en bois utilisés furent découpés dans une même planche de sapin. Leurs faces furent taillées perpendiculairement aux fibres du bois. La transmission a lieu par suite dans une direction parallèle aux fibres.

A l'époque où furent effectuées ces expériences nous ne disposions pas d'une quantité suffisante de dynamite n° 1 à 75 % de nitroglycérine. Nous avons utilisé comme explosif excitateur un mélange de dynamite contenant 75 % et de dynamite contenant 65 % de nitroglycérine. L'explosif excité était le fulminate de mercure à la densité de chargement 1,25.

Nous désignons encore par D la distance entre la colonne excitatrice et la colonne excitée. Cette distance est celle séparant le fond des deux cavités.

Pour D inférieur à 3 cm. la détonation par influence du fulminate se produit normalement. L'onde explosive se propage dans toute la colonne avec une vitesse égale à 2600 m/sec. C'est dans ces conditions la vitesse de détonation du fulminate de mercure.

Pour D compris entre 3 et 3,15 cm. la détonation par influence se transmet encore au fulminate, mais cette transmission, devenue difficile, présente des caractères particuliers.

Le régime détonant ne s'établit pas dès le début de la colonne de fulminate. Une décomposition très peu lumineuse se propage sur une longueur variable (longueur d'autant plus grande que la distance D est plus grande) avant de donner naissance à l'onde explosive proprement dite.

La vitesse de propagation de cette décomposition (de l'ordre de 1000 m/sec) est bien inférieure à la vitesse de détonation normale du fulminate mais par contre bien supérieure aux vitesses de combustion indiquées au chapitre III. Il s'agit donc encore d'un régime intermédiaire entre la déflagration franche et la détonation franche.

Pour D supérieur à 3 cm. 15 la détonation par influence ne se transmet plus au fulminate. Le tube de verre contenant cet explosif est brisé, le ful-

minate est projeté. Une partie se répand sur le tréteau d'explosion et brûle comme le montrent de larges plages lumineuses observées sur les photographies.

Les photographies I, II, III, IV représentées par la figure 86 ont été obtenues dans ces conditions expérimentales et correspondent à différentes valeurs de D.

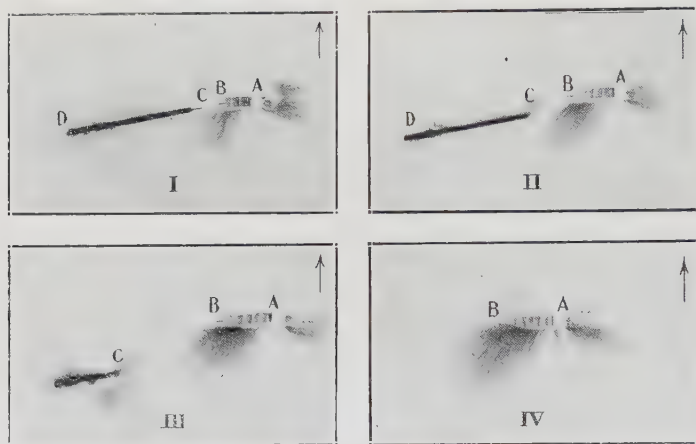


Fig. 86. — Transmission de la détonation par influence d'une colonne de dynamite à une colonne de fulminate, à travers le bois de sapin (pour différentes valeurs de D).

Pour obtenir une densité de chargement aussi élevée que possible nous comprimons la dynamite par couches successives à l'aide d'une baguette en bois. Les différentes couches d'explosif contribuent à donner à l'image de la détonation de la dynamite un aspect strié caractéristique.

I. — $D = 2 \text{ cm}$. 5. Le régime normal de la détonation s'est établi dès le début de la colonne de fulminate excitée par influence. La vitesse de détonation de la dynamite est égale à 6500 m/sec.; celle du fulminate est de 2600 m/sec..

On voit en A B l'image de la détonation de la dynamite et en C D l'image de la détonation du fulminate.

II. — $D = 3 \text{ cm}$. L'onde explosive a pris naissance dans le fulminate en C, 3 cm. après le début de la colonne, et s'est propagée à une vitesse de 2500 m/sec.

III. — $D = 3 \text{ cm}$. 1. Le régime de la détonation a pris naissance dans le fulminate de mercure en C, 13 cm. après le début de la colonne. La vitesse de détonation est voisine de 2600 m/sec.

IV. — $D = 4$ cm. Les plages lumineuses signalées plus haut sont visibles sur la photographie originale, malheureusement nous n'avons pu reproduire qu'une partie de cette photographie.

REMARQUE SUR LES RETARDS D'EXCITATION DU FULMINATE DE MERCURE

t étant le temps écoulé entre la détonation de la dynamite et la détonation du fulminate nous avons mesuré pour différentes valeurs de D le rapport $\frac{D}{t}$.

Si on pouvait considérer les retards d'excitation du fulminate de mercure comme négligeables, le rapport $\frac{D}{t}$ représenterait la vitesse moyenne de propagation de l'onde de choc à travers le bois de sapin.

Le calcul nous a donné.

$$\begin{aligned} \text{pour } D = 2,5 \text{ cm.} \quad \frac{D}{t} &= 1700 \text{ m./sec.} \\ D = 2,95 \text{ cm.} \quad \frac{D}{t} &= 1350 \text{ m./sec.} \end{aligned}$$

La vitesse du son dans le bois de sapin est d'après STEFAN 5256 m/sec. et d'après MELDE 4179 m/sec. (tables de LANDOLT). Ces nombres sont très supérieurs aux rapports $\frac{D}{t}$ calculés. Il faut par conséquent admettre que les

retards d'excitation du fulminate de mercure sont dans ces conditions tout à fait appréciables. On peut avoir une idée de la grandeur de ces retards en supposant la vitesse de l'onde de choc égale à celle du son, soit 4700 m/sec.

On trouve ainsi :

$$\begin{aligned} \text{pour } D = 2,5 \text{ cm.} \quad R &= 9,3 \times 10^{-6} \text{ sec.} \\ \text{pour } D = 2,95 \text{ cm.} \quad R &= 16 \times 10^{-6} \text{ sec.} \end{aligned}$$

Nous avons l'intention de poursuivre cette étude en utilisant l'acier comme milieu de transmission. Nous avons dû, en raison du danger pré-

senté par les éclats métalliques, nous limiter à quelques expériences. Il semble bien que les phénomènes présentent une étroite analogie avec ceux observés dans le cas du bois de sapin.

En résumé :

Dans la première partie de ce chapitre nous avons étudié la transmission de la détonation à distance à travers l'air.

1° *Lorsque la distance entre l'explosif excitateur et l'explosif excité est inférieure à la distance au bout de laquelle se séparent l'onde de choc et les gaz en combustion* c'est lorsque ces deux phénomènes (onde de choc et gaz en combustion) arrivent au contact de l'explosif excité que celui-ci détone.

2° *Au delà du point de séparation de l'onde de choc et des gaz*, c'est l'onde de choc seule qui produit la détonation du deuxième explosif.

Ces faits mettent en évidence l'importance pratique du point de séparation de l'onde de choc et des gaz.

3° Mais à partir d'un certain point l'onde de choc ne possède plus suffisamment d'énergie pour provoquer la détonation qui est alors amorcée par les *gaz chauds*, venant ensuite.

La vitesse de propagation de l'onde et celle des gaz n'étant plus les mêmes à partir du point de séparation, et surtout la dernière s'amortissant beaucoup plus rapidement que la première, il en résulte que lorsque la détonation est due aux gaz chauds elle a lieu au bout d'un temps beaucoup plus long que lorsqu'elle est provoquée par l'onde de choc.

Ces phénomènes correspondent à la transmission de la détonation dans la direction de la propagation de l'onde explosive dans la cartouche excitée. Nous avons montré que la détonation de la première tranche de la cartouche excitatrice peut produire dans la direction inverse des phénomènes tout à fait analogues.

Lorsque l'explosif est contenu dans une enveloppe métallique la détonation peut être transmise à distance par la projection des éclats de l'enveloppe. Nous n'avons pu étudier systématiquement les conditions dans lesquelles se produit ce phénomène dont l'existence a déjà été vérifiée expérimentalement par bien d'autres méthodes.

Ces résultats ont été obtenus en transmettant la détonation à un explosif très sensible, le fulminate de mercure. Il est probable qu'ils pourraient être étendus à d'autres corps, mais il faudrait alors mettre en œuvre de bien plus grandes quantités d'explosif excitateur que nous ne pouvions le faire dans des expériences de laboratoire.

Dans la seconde partie de ce chapitre nous avons étudié l'établissement du régime de la détonation dans un explosif excité par influence (acide picrique et dynamite). Lorsque la distance séparant les deux colonnes d'explosif est voisine de celle pour laquelle la transmission cesse d'être possible le régime de détonation franche ne s'établit pas dès le début de la colonne excitée. *On observe alors des régimes explosifs intermédiaires entre la combustion et la détonation franche.* Ces régimes intermédiaires peuvent, suivant les cas, ou bien *cesser de se propager*, ou bien *donner naissance à la détonation normale.*

Enfin nous avons étudié la transmission de la détonation par influence à travers le bois de sapin. En utilisant comme explosif excité le fulminate de mercure, *nous avons observé des régimes explosifs intermédiaires entre la combustion et la détonation franche de cet explosif.* Le retard d'excitation du fulminate de mercure peut être de l'ordre de 10^{-5} sec.



RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Nous avons dans ce mémoire rapporté les résultats des recherches que nous avons entreprises pour étudier la déflagration et la détonation des explosifs solides.

Ces recherches ont porté d'abord sur les explosifs d'amorçage et en particulier sur le fulminate de mercure dont nous avons incidemment étudié diverses propriétés physiques ou chimiques : couleur, forme cristalline, densité. Nous avons cherché à expliquer les résultats souvent contradictoires publiés par différents auteurs.

Nous avons montré que le fulminate de mercure exposé aux radiations ultra-violettes de la lampe à vapeur de mercure se transformait en un produit noirâtre sans changement de forme cristalline. Ce produit de transformation ne se distingue pas analytiquement (dosage du mercure) du fulminate ; il est plus inflammable mais moins explosif que le fulminate de mercure lui-même.

Les températures d'explosion avec et sans retard de différents échantillons de fulminate de mercure et d'hexaméthylènetriperoxydediamine ont été déterminées. Pour diverses températures intermédiaires entre ces températures extrêmes, nous avons mesuré les retards d'explosion.

Nous avons décrit un appareillage permettant l'étude à température constante et sous différentes pressions de l'action de la chaleur sur les explosifs. Le cas du fulminate de mercure a fait l'objet d'une étude spéciale. Nous avons établi les conditions de pression et de température réglant la décomposition lente (avec dégagement gazeux) et l'explosion de ce composé. Dans chaque intervalle de température nous avons étudié l'explosion ou la décomposition ou bien encore la superposition de ces deux phénomènes. L'influence de la quantité d'explosif a été étudiée. L'influence de la nature du milieu gazeux (inappréciable) et celle du plomb tétréthyle (prodétonante) ont été également envisagées.

Indépendamment de la décomposition étudiée précédemment, le fulminate de mercure se transforme sous l'action de la chaleur en un produit plus inflammable que le fulminate lui-même. Il nous a été impossible de distinguer analytiquement ce produit du fulminate. Néanmoins l'étude de cette transformation nous a permis de donner des renseignements sur la nature du retard d'explosion.

Pour différents explosifs d'amorçage, nous avons étudié les caractères de la décomposition sous l'action de la chaleur et du choc. A la suite de cette étude, nous avons été amené à classer les explosifs d'amorçage en deux catégories ayant respectivement pour type l'azoture de plomb et le fulminate de mercure. Nous avons montré que le peroxyde de tricycloacétone constituait un cas particulier remarquable.

Nous avons ensuite étudié par la méthode d'enregistrement chrono-photographique de MALLARD et LE CHATELIER la formation de l'onde explosive par inflammation dans les explosifs d'amorçage. Avec les explosifs du type azoture de plomb la formation de l'onde explosive est toujours instantanée. Avec les explosifs du type fulminate de mercure le régime détonant s'établit au contraire après une période plus ou moins importante de combustion. En utilisant le fulminate de mercure pur ou mélangé avec du sable et du tétryl nous avons pu dans certaines conditions, étudier la déflagration et le passage de la déflagration à la détonation. En particulier, nous avons montré que l'onde explosive — contrairement à ce que l'on observe dans le cas des mélanges gazeux — prend naissance dans une partie de la masse déjà en combustion.

Différents résultats obtenus sur les explosifs d'amorçage nous ont permis de préciser quelques points du problème de l'amorçage, en particulier sur la notion de charge limite.

Dans la seconde partie de ce travail nous avons décrit un procédé optique permettant d'enregistrer, par la méthode de MALLARD et LE CHATELIER, non seulement les phénomènes lumineux provoqués par la détonation des explosifs, mais encore les phénomènes non lumineux (ondes de choc et projections solides).

Par cette méthode, nous avons mis en évidence une onde se propageant à une vitesse sensiblement constante dans les parois des tubes de verre contenant l'explosif. Cette vitesse est du même ordre de grandeur que la vitesse du son dans le verre. Lorsque le phénomène parvient à l'extrémité du tube de verre il produit dans l'air une perturbation se propageant à une vitesse très faible (60 m/sec.). Cette perturbation a été attribuée à la projection en avant de l'extrémité du tube de verre.

Nous avons ensuite étudié la propagation des gaz lumineux lancés en avant par la détonation des explosifs, ainsi que celle de l'onde de choc non lumineuse. Ces phénomènes se propagent d'abord à la même vitesse leurs fronts coïncident et ils constituent en quelque sorte le prolongement dans l'atmosphère de l'onde explosive. Ensuite, la vitesse des gaz lumineux s'amortit plus rapidement que celle de l'onde de choc et à un moment donné

les deux phénomènes se séparent. Nous avons mesuré dans différentes conditions à quelle distance de l'explosif se produit cette séparation ainsi que la vitesse de ces phénomènes à différentes distances de la colonne d'explosif. L'influence de la densité de chargement, du diamètre et de la longueur de la colonne d'explosif a été examinée. Nous avons montré, en particulier, que la vitesse de l'onde de choc et des gaz est — sauf pour de très faibles valeurs de la densité de chargement — indépendante des conditions expérimentales. Cette vitesse, voisine de 6200 m/sec., est donc une limite supérieure pour les ébranlements dans l'air.

Nous avons ensuite appliqué ces résultats à l'étude du problème de la transmission de la détonation par influence à travers l'air. En utilisant comme explosif excité le fulminate de mercure, nous avons montré que le mécanisme de la transmission est différent suivant la grandeur de la distance séparant l'explosif excitateur de l'explosif excité. La détonation par influence est en effet provoquée :

1° Par action combinée de l'onde de choc et des gaz lumineux dans la région où ces deux phénomènes coïncident.

2° Par l'onde de choc seule à partir du point où, s'étant séparée des gaz, elle les précède.

3° Par les gaz seuls, à partir d'une certaine distance où l'onde de choc semble ne plus posséder suffisamment d'énergie.

Nous avons étudié par la méthode d'enregistrement photographique l'établissement du régime de la détonation dans un explosif excité par influence (acide picrique). Quand la distance séparant les deux explosifs est voisine de celle pour laquelle la transmission cesse d'être possible, nous avons pu mettre en évidence la propagation à vitesses croissantes ou décroissantes de régimes explosifs intermédiaires entre la déflagration franche et la détonation franche.

Nous avons enfin étudié, par la même méthode, la transmission de la détonation à distance à travers le bois. En utilisant comme explosif excité le fulminate de mercure, nous avons observé des phénomènes analogues à ceux obtenus avec l'acide picrique (régimes intermédiaires entre la déflagration et la détonation). Le retard d'excitation du fulminate de mercure est de l'ordre de 10^{-5} seconde.



INDEX BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION

- (1) BERTHELOT et VIEILLE. — C. R. 93 (1881), p. 18.
- (2) BERTHELOT. — *Sur la force des matières explosives*, 3^e édition, Paris 1883, I, p. 151.
- (3) DIXON. — *Phil. Trans.*, 184 A (1893), p. 97.
- (4) HUGONIOÛ. — *Journal de Math. pures et appli.*, 4^e série, 3 (1887), p. 477; et *Journal de l'Ecole Polyt.*, 57^e et 58^e cahiers, 1887 et 1889.
- (5) SCHUSTER. — Note annexée au mémoire de Dixon : *On the movements of the flamme in the explosions of the gases. Bakerian lectures; Philosophical Trans. of the Royal Soc. of London*, A, 200 (1903), p. 315.
- (6) CHAPMANN. — *On the rate of explosion in gases; Phil. Magazine*, Janvier 1899.
- (7) JOUGUET. — Les travaux de Jouguet sont publiés dans une série de notes aux Comptes rendus, à partir de 1901. L'ensemble de sa théorie est exposée dans un ouvrage publié chez Doin, dans la collection de l'*Encyclopédie Scientifique, Mécanique des Explosifs*, Paris, 1917.
- (8) CRUSSARD. — Les combustions à pressions constantes; *Bull. de la Soc. de l'Ind. Minérale*, 5^e série, 3 (1913).
- (9) ROUX et SARRAU. — C. R., 76 (1873), p. 1089.
- (10) C. CAMPBELL. — *Chem. Soc.*, 121, part. 2 (1922), p. 2483.
- (11) P. LAFFITTE. — C. R., 179 (1924), p. 1394.
- (12) BERTHELOT. — *Ann. Ch. et Phys.*, 6^e série, 6 (1885), p. 856.
- (13) METTEGANG. — V^e Congrès de Chimie appliquée, Berlin, 1903, t. 2, p. 322.
- (14) KAST. — *Zeit. Schiess Sprengst.*, 8 (1913), p. 135.
- (15) DAUTRICHE. — C. R., 143 (1906), p. 691 et 144 (1907), p. 1030.
- (16) WAGSTAFF. — *Proced. Roy. Soc.*, série A, 105 (1924), p. 282.
- (17) RADAKOVIC. — *Wien. Ber.*, 2a, 109 (1900), pp. 276 et 941.
- (18) LAFFITTE. — C. R., 178 (1924), p. 1277.
- (19) MALLARD et LE CHATELIER. — *Ann. Mines*, 8^e série, 4 (1883), p. 274.
- (20) DIXON. — *Phil. Trans.*, série A, 200 (1903), p. 315.
- (21) PERROTT et GAWTHROP. — *J. Franklin Inst.*, 1927, pp. 103 et 387.
- (22) JONES. — *Proc. Royal Soc.*, A, 120 (1928), p. 603.
- (23) T. URBANSKI. — *Roczniki Chem.*, 6 (1926), p. 838-47.
- (24) PAYMANN et ROBINSON. — *Mines Department, Safety in Mines Research Board*, Paper n^o 18, 1926.
PAYMANN et SHEPHERD. — *Mines Department, Safety in Mines Research Board*, Paper n^o 29, 1926.

CHAPITRE I

- (1) MATTER. — *Brevet allemand* 301-090, 1917, d'après KOESTER, *Thèse Berlin*, 1929.
- (2) D'après A. MELLOR. — *Inorganic Chemistry*, t. 8, p. 353.

- (3) GARNER et GOMM. — *Chem. Soc.*, août 1931, p. 2123.
- (4) SOMMER et PINCAS. — *Berichte*, 48 (1915), p. 1963.
- (5) HOWARD. — *Phil. Trans.*, 90, I, (1800), p. 204, et *Gilberts Ann.*, 37 (1800), p. 75.
- (6) CHANDELON. — *Mém. Soc. Rôy. Sciences* (1848), *Dingl polyt. journ.*, 108 (1848), p. 21.
- (7) LIEBIG. — *Liebig Ann.*, 95 (1855), p. 284.
- (8) BECKMANN. — *Berichte*, 19 (1886), p. 993.
- (9) LOBRY DE BRUYN. — *Berichte*, 19 (1886), p. 1370.
- (10) SOLONINA. — *Z. Schiess Sprengst*, 5 (1910), p. 42.
- (11) L. WOHLER et THEODOROWITSCH. — *Berichte*, 38 (1905), p. 1348.
- (12) LANGHANS. — *Z. Schiess Sprengst*, Janvier-Février 1920.
- (13) KAST. — *Spreng und Zündstoffe*. — *Braunschweig* (1921).
- (14) STEINER. — *Berichte*, 9 (1876), p. 786.
- (15) STEINER. — *Berichte*, 8 (1875), p. 1177.
- (16) PHILIPP. — *Z. Schiess Sprengst*, 7 (1912), p. 223.
- (17) SOLONINA. — *Z. Schiess Sprengst*, 5 (1910), p. 69, et aussi PHILIP : *Z. Schiess Sprengst*, 7 (1912), p. 1922.
- (18) ROSE. — *Pogg. Ann.*, 110 (1860), p. 529.
- (19) SOLONINA. — *Z. Schiess Sprengst*, 5 (1910), p. 71.
- (20) BROWNSDON. — *Chem. News*, 89 (1904), p. 303.
- (21) PHILIP. — *Z. Schiess Sprengst*, 7 (1912), p. 109.
- (22) PHILIP. — *Z. Schiess Sprengst*, 7 (1912), p. 158.
- (23) MILES. — *Chem. Soc.*, Octobre 1931, p. 2540.
- (24) NICOLARDOT et BOUDET. — *Bull. Soc. Chim.*, 25 (1919), p. 119.
- (25) BERTHELOT. — *Ann. Chim. Phys.* (5), 21 (1880), p. 569, et *C. R.*, 90 (1880), p. 946.
- (26) SOLONINA. — *Z. Schiess Sprengst*, 5 (1910), p. 68.
- (27) GAY-LUSSAC et LIEBIG. — *Ann. Chim. Phys.*, 25 (1824), p. 285.
- (28) GIRSEWALD. — *Brevets allemands*, 263-459 et 274-522.
- (29) TAYLOR et RINKENBACH. — *Army ordnance*, 5 (1924), p. 463, et *Z. Schiess Sprengst*, 20 (1925), p. 11.
- (30) H. KOESTER. — *Thèse Berlin*, 1929.
- (31) WOLFFENSTEIN. — *Berichte*, 28 (1895), p. 2265.
- (32) BAEYER et VILLIGER. — *Berichte*, 33 (1900), p. 858.
- (33) BEILSTEIN. — *Traité de Chimie organique*, vol. 1^a, Berlin 1918, p. 645.

CHAPITRE II

- (1) MALLARD et LE CHATELIER. — *Ann. Mines*, 8^e série, 4 (1883), p. 274.
- (2) JOUGUET. — *Mécanique des explosifs*, Doin à Paris (1917), p. 138.
- (3) WÖHLER et METTER. — *Zeit. Schiess Sprengst*, 2 (1907), p. 204.
- (4) WÖHLER. — *Zeit. Angew. Chemie*, 30 (1917), p. 33.
- (5) TAFFANEL, DAUTRICHE, DURR, PERRIN. — *Ann. Mines*, XI^e série, 7, (1919), p. 30.
- (6) MURAOUR. — *Bulletin Soc. Chim.* (4), 41 (1927), p. 620; voir aussi *ibidem* (4), 39 (1926), p. 1711.

- (7) SNELLING et STORM. — *Washington; Bureau of Mines; Technical paper* 12.
- (8) W.-E. GARNER et A.-S. GOMM. — *Chem. Soc.*, août 1931, p. 2123.
- (9) TAMMANN et KRÖGER. — *Z. Anorg. Chem.*, 169 (1928), p. 1-32.
- (10) BERTHELOT. — *C. R.*, 90 (1880), p. 946.
- (11) HOITSEMA. — *Zeit. Phys. Chemie*, 21 (1896), p. 147.
- (12) HESS et DIETL. — Voir ESCALES et STETTbacher : *Initialexplosivstoffe*, p. 137, et GUTTMANN : *Industrie der Explosivstoffe*, 1895.
- (13) A. LANGHANS. — *Zeit. Schiess Sprengst*, 17 (1922), pp. 122-6, 131-3, 150-3, 159-62.
- (14) FARMER. — *J. Chem. Soc.*, 121 (1922).
- (15) HENRY. — *Thèse Doctorat d'Université*, Paris, 1927, et *Bull. Soc. Chim.*, 23 (1923), p. 412.

CHAPITRE III

- (1) GARNER et GOMM. — *Chem. Soc.*, août 1931, p. 2123.
- (2) LAFFITTE. — *Annales de Physique*, 7 série, 14 (1925), p. 587.
- (3) HESS et DIETL. — Voir ESCALES et STETTbacher : *Initialexplosivstoffe*, p. 137; GUTTMANN : *Industrie der Explosivstoffe*, et MUSPRATT, vol. VIII, p. 968 (d'après LANGHANS).
- (4) DIXON. — *Phil. Trans.*, série A, 200 (1903), p. 315.
- (5) LAFFITTE. — *Annales de Physique*, 14 (1925), p. 605.
- (6) JOUGUET. — *Mécanique des explosifs*, Paris (1917), p. 433.
- (7) BECKER. — *Zeit. für Electrochemie*, 23 (1917), p. 40, et *Zeitsch für techn. Physik*, 7 (1922), p. 152.
- (8) KOESTER. — *Thèse Docteur Ingénieur*, Berlin, 1928.

CHAPITRE IV

- (1) WÖHLER. — *Zeit. Schiess Sprengst*, 1, 2, 3, 4, 5 (1917), pp. 1, 18, 39, 54, 74.

CHAPITRE V

- (1) ROBERTSON. — *Chem. Soc.*, 49 (1921), p. 1.
- (2) BICHEL. — *Glückauf*, 41 (1905), p. 1194.
- (3) KLINGT et FLORENTIN. — *C. R.*, 156 (1913), p. 694.
- (4) KAST. — *Spreng und Zündstoffe*, p. 71.
- (5) ESCALES et STETTbacher. — *Initial explosivstoffe*, p. 193.
- (6) LAFFITTE. — *C. R.*, 178 (1924), p. 1277.

CHAPITRE VI

- (1) CRUSSARD. — *Bull. Soc. Ind. Minérale*, 4 (1907), p. 257.
- (2) JOUGUET. — *Mécanique des explosifs*, Paris, 1917.
- (3) VIEILLE. — *Mém. Poudres et Salp.*, 10 (1899), p. 177; *C. R.*, 131 (1900), p. 413.
- (4) DAUTRICHE. — *C. R.*, 144 (1907), p. 1030.
- (5) COMEY. — *VII^e Congrès Int. Ch. App.*, Londres (1909), Section 3, b, p. 28.

- (6) BURLOT. — *Mém. Artillerie française*, 5 (1926).
- (7) FOUCAULT. — *Ann. de l'Observ. de Paris*, 5 (1859), p. 197.
- (8) TÖPLER. — *Beobachtungen nach einer neuen optischen methode*. — Bonn (1864); *Ann. der Physik*, 33 (1867), p. 131.
- (9) DVORAK. — *Ann. der Physik*, 9 (1880), p. 502.
- (10) BOYS. — *J. Phot. Soc.* (1892), p. 199; *Nature*, 47 (1893), pp. 415, 440.
- (11) QUAYLE. — *J. Franklin Inst.*, 19 (1922), pp. 193, 627; *Nature*, 115 (1925), p. 765.
- (12) FOLEY et SOUDER. — *Phys. Review*, 35 (1912), p. 373.
- (13) WARTENBERG et KANNENBERG. — *Zeits. Phys. Chem.*, 105 (1923), p. 205.
- (14) WHITE. — *J. Chem. Soc.* (1928), p. 1159.
- (15) TÖPLER. — *Ann. der Physik*, 27 (1908), pp. 1043, 1051.
- (16) MACH. — *Ann. der Physik*, 159 (1876), p. 330; 40 (1890), p. 140.
- (17) WOOD. — *Phil. Mag*, 48 (1899), p. 218; 50 (1900), p. 148.
- (18) CRANZ et BAMES. — *Zeit. Ang. Chem.*, 36 (1923), p. 76.
- (19) ALLEN. — *Proc. Roy. Phil. Soc. Glasgow*, 33 (1902), p. 71.
- (20) PAYMANN et ROBINSON. — *Safety Mines Research Pap.*, n° 18 (1926).
PAYMANN et SHEPHERD. — — — — — n° 29 (1926).
PAYMANN. — *Proc. Roy. Soc. A.*, 120 (1928), p. 90.
- (21) GAWTHROP, SHEPHERD et PERROTT. — *J. Franklin Inst.*, 211 (1931), p. 67.
- (22) LAFFITTE et PATRY. — *C. R.*, 191 (1930), p. 1335.
- (23) VAUTHIER. — *Ann. de Physique*, 14 (novembre 1930).

CHAPITRE VII

- (1) JONES. — *Proc. Roy. Soc.*, série A, 120, p. 603.
- (2) PAYMANN et ROBINSON. — *Mines Department — Safety in Mines Research Board*, Paper n° 18 (1926).
PAYMANN et SHEPHERD. — *Mines Department — Safety in Mines Research Board*, Paper n° 29 (1926).
- (3) GAWTHROP, SHEPHERD et PERROTT. — *Journal of the Franklin Institute*, 211, n° 1, janvier 1931, p. 67.

CHAPITRE VIII

- (1) BERTHELOT. — *Sur la force des Matières explosives*, Paris, 1883, 3^e édition, p. 117.
- (2) AUDIBERT. — *Ann. Mines*, 12^e section (1923), p. 5.
- (3) ABEL. — D'après BERTHELOT « Sur la force... », p. 123.
- (4) CHAMPION et PELLET. — D'après BERTHELOT « Sur la force... », p. 123.
- (5) Ch.-E. MUNROE. — *J. Am. Chem. soc.*, 15 (1893), p. 10.
- (6) DAUTRICHE. — *C. R.*, 144 (1907), p. 1030.
- (7) COMEY. — *VII^e Congrès Int. Ch. App.*, Londres 1909, section III, b, p. 28.
- (8) LAFFITTE. — *C. R.*, 178 (1924), p. 1277, et *Ann. phys.*, 4 (1925), p. 587.
- (9) PERROTT et GAWTHROP. — *Journal of the Frankl. Inst.*, mars 1927.
- (10) STORM. — *Army Ordnance*, mars-avril 1928; *Mém. Artill. fr.*, 5, p. 251.
- (11) BURLOT. — *Mém. Artill. fr.*, IX, 4^e fascicule de 1930, p. 799.

(Bibliographie arrêtée le 1^{er} Juillet 1932.)

TABLE DES MATIÈRES

	PAGES
INTRODUCTION.....	7
<i>A)</i> Définitions et historique.....	7
<i>B)</i> Plan du mémoire.....	13
CHAPITRE I	
<i>Explosifs utilisés — Préparation — Propriétés.....</i>	15
CHAPITRE II	
<i>Action de la chaleur sur le fulminate de mercure.....</i>	27
<i>A)</i> Températures d'explosion du fulminate de mercure.....	29
<i>B)</i> Décomposition lente et explosion du fulminate de mercure.....	33
<i>C)</i> Transformation du fulminate de mercure sans dégagement gazeux	51
<i>D)</i> Températures d'explosion de l'Hexaméthylènetriperoxydediamine	57
CHAPITRE III	
<i>La formation de l'onde explosive dans les explosifs d'amorçage.....</i>	61
<i>A)</i> Décomposition explosive sous l'action de la chaleur et du choc..	64
<i>B)</i> Combustion et formation de l'onde explosive dans les explosifs d'amorçage.....	68
CHAPITRE IV	
<i>L'amorçage.....</i>	85
<i>A)</i> Pouvoir exciteateur des explosifs d'amorçage.....	85
<i>B)</i> Formation de l'onde explosive dans les explosifs secondaires....	87
CHAPITRE V	
<i>La détonation et les phénomènes lumineux.....</i>	91
<i>A)</i> Vitesse de détonation du fulminate de mercure.....	91
<i>B)</i> Gaz en combustion projetés en avant par la détonation de la der- nière tranche d'explosif.....	92
<i>C)</i> Gaz en combustion projetés en arrière par la détonation de la première tranche d'explosif.....	97

CHAPITRE VI

<i>L'onde de choc</i>	99
A) Méthodes d'étude.....	99
B) Dispositif expérimental....	106

CHAPITRE VII

<i>Etude expérimentale des ondes de choc</i>	109
A) Onde se propageant dans les parois des tubes de verre.....	109
B) Onde se propageant dans les parois des tubes en acétate de cellulose.....	120
C) Onde de choc aérienne.....	122

CHAPITRE VIII

<i>La transmission de la détonation à distance</i>	145
A) Mécanisme de la transmission dans l'air.....	145
B) Etablissement du régime de la détonation dans l'explosif excité par influence.....	161
C) Transmission de la détonation par influence à travers les milieux solides.....	165
Résumé et Conclusions.....	173
Index Bibliographique.....	177



DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ :

L'ÉTAT SUPRACONDUCTEUR

VU ET APPROUVÉ :

Nancy, le 7 février 1933,

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

L. LEAU.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Nancy, le 8 février 1933,

Le Recteur de l'Académie de Nancy,

Président du Conseil de l'Université,

L. BRUNTZ.



SOCIÉTÉ D'IMPRESSIONS TYPOGRAPHIQUES

2, Rue René-d'Anjou, 2

(Ancienne rue de la Manutention)

NANCY

